

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské technologie

**Porovnání bezkontaktních a kontaktních měřících metod při
hodnocení kvality řezných povrchů vytvořených různými
technologiemi**

Comparison of Contact and Contactless Measurement Methods in
Evaluating the Quality of Cutting Surfaces Created by Different
Technologies

Student:

Bc. Veronika Nováková

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Libor Sitek, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Veronika Nováková**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 10 Technologický management
Téma: Porovnání bezkontaktních a kontaktních měřicích metod při hodnocení
kvality řezných povrchů vytvořených různými technologiemi
Comparison of Contact and Contactless Measurement Methods in
Evaluating the Quality of Cutting Surfaces Created by Different
Technologies
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Studium základní literatury a tvorba rešerše.
2. Metody hodnocení topografie a kvality povrchů.
3. Vytvoření několika řezů různými technologiemi na jednom typu materiálu.
4. Aplikace kontaktních a nekontaktních metod při hodnocení kvality řezných ploch.
5. Analýza a interpretace naměřených dat a porovnání měřicích metod.

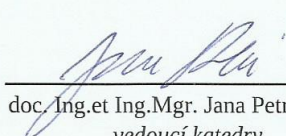
Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TUO, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
[2] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I*. VŠB-TUO, 2009, 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
[3] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění II – Obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem*. Ostrava : VŠB-TUO, 2016, 117 s. ISBN 978-80-248-3944-8.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libor Sitek, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016
Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci, včetně příloh, vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

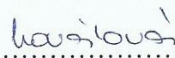
V Ostravě 10.5.2017

houšková

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě10.5.2017.....

..........

Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Veronika Nováková

Adresa trvalého pobytu autora práce: Jana Maluchy 203/51, Ostrava-Dubina, 700 30

Poděkování:

Děkuji Ing. Liboru Sitkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat zaměstnancům Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i za pomoc při experimentech a za poskytnutí literárních podkladů.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

NOVÁKOVÁ, V. *Porovnání bezkontaktních a kontaktních měřících metod při hodnocení kvality řezných povrchů vytvořených různými technologiemi*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2017, 90 s. Vedoucí práce: Ing. Libor Sitek, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá srovnáním kontaktních a bezkontaktních měřících metod hodnocení kvality řezných povrchů, pro daný strojírenský materiál, zhotovených s použitím technologie abrazivního vodního paprsku, laserového paprsku a pásové pily. Zkušební vzorky byly vytvořeny s použitím všech tří dělicích technologií za rozdílných podmínek řezu. Tím byly získány série zkušebních vzorků s rozdílnou kvalitou řezných stěn. Diplomová práce je rozdělena na dvě hlavní části. V první teoretické části jsou popsány vybrané nekonvenční technologie. Druhá část práce je zaměřena na experiment, který porovnává kvalitu řezných ploch pomocí kontaktní a bezkontaktní metody měření. V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky (kvalita, vzhled a drsnost řezného povrchu) v souvislosti s druhem technického materiálu a parametry jednotlivých řezů.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

NOVÁKOVÁ, V. *Comparison of Contact and Contactless Measurement Methods in Evaluating the Quality of Cutting Surfaces Created by Different Technologies*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, 2017, 90 s. Supervisor: Ing. Libor Sitek, Ph.D.

The master's thesis deals with the comparison of contact and non-contact measuring methods in the evaluation of quality of cutting faces, for the given engineering material, made using abrasive water jet technology, laser beam and band saws. The samples were created using all three cutting technologies under different cutting conditions. This way were obtained series of samples with different cutting-edge quality. The master's thesis is divided into two main parts. The first theoretical part describes selected unconventional technologies. The second part of the thesis is focused on the experiment, which compares the quality of cutting faces with the contact and non-contact method of measurement. At the end of the thesis the results (quality, appearance and roughness of the cutting face) are evaluated in relation to the type of technical material and the parameters of the individual cuts.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	10
ÚVOD	11
1 HISTORIE OBRÁBĚNÍ.....	13
2 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ.....	14
2.1 Elektroerozivní obrábění	17
2.2 Obrábění paprskem plasmy	19
2.3 Obrábění paprskem laseru	21
2.4 Elektrochemické obrábění.....	22
2.5 Chemické obrábění.....	24
2.6 Ultrazvukové obrábění	24
2.7 Obrábění paprskem vody	25
3 Obrábění abrazivním vodním paprskem.....	26
3.1 Historie vodního paprsku	26
3.2 Abrazivní vodní paprsek	28
3.3 Abraziva a jejich složení	30
4 Obrábění paprskem laseru	33
4.1 Historie laserového paprsku	33
4.2 Laserový paprsek	34
5 Metrologie a její význam	36
5.1 Základní pojmy a měření	37
5.2 Chyby a nejistoty měření	38
5.2.1 Hrubé chyby.....	39
5.2.2 Systematické chyby	40
5.2.3 Náhodné chyby	41
6 Hodnocení drsnosti povrchu	41
6.1 Základní pojmy	41

6.2	Parametry drsnosti.....	43
6.2.1	Výškové parametry	44
6.2.2	Délkové parametry	46
6.3	Kontrola parametrů drsnosti.....	47
6.3.1	Měření drsnosti povrchu dotykovým profilometrem.....	47
6.3.2	Měření drsnosti povrchu optickou metodou	48
7	Experimentální část.....	49
7.1	Parametry použitého abrazivního vodního paprsku	49
7.2	Parametry použitého laseru	50
7.3	Parametry použité pily	51
7.4	Použitý dotykový profilometr [39, 40].....	52
7.5	Použitý optický profilometr	53
7.6	Materiál AlMg ₃ - ČSN 424413	55
8	Výsledky experimentů	57
8.1	Abrazivní vodní paprsek	58
	Zkušební vzorek č. 1	58
	Zkušební vzorek č. 2	60
8.2	Abrazivní vodní paprsek	62
	Zkušební vzorek č. 3	62
	Zkušební vzorek č. 4	64
8.3	Laserový paprsek	66
	Zkušební vzorek č. 5	66
	Zkušební vzorek č. 6	68
8.4	Laserový paprsek	70
	Zkušební vzorek č. 7	70
	Zkušební vzorek č. 8	72
8.5	Pila.....	74

Zkušební vzorek č. 9	74
Zkušební vzorek č. 10	76
8.6 Srovnání vzorků	78
8.7 Srovnání měřicích metod	80
9 Hodnocení	83
10 Závěr	85
11 Použitá literatura	86

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka/symbol	jednotka	popis
ASJ	-	Abrasive Suspension Jet (Abrasive Slurry jet)
AWJM	-	Abrasive Water Jet Machining
AWJP	-	Abrazivní vodní paprsek (řezná rychlost $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
AWJR	-	Abrazivní vodní paprsek (řezná rychlost $950 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
CGPM	-	Conférence Générale des Poids et Mesures Generální konference pro váhy a míry
DIAJet	-	Direct Injection Abrasive Jet
ECM	-	Elektro Chemical Machining
EDM	-	Elektro Discharge Machining
CM/CHM	-	Chemical Machining
LASER	-	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LBM	-	Laser Beam Machining
MASER	-	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
PBM	-	Plasma Beam Machining
SI	-	Le Système International d'Unités Soustava fyzikálních veličin
USM	-	Ultra Sonic Machining
WJM	-	Water Jet Machining

ÚVOD

Průmyslová výroba má v České republice hluboké historické kořeny. České země tvořily průmyslovou základnu již v době Rakouska-Uherska, a přibližně 70% průmyslové výroby celé rakousko-uherské monarchie bylo soustředěno v českých zemích. Průmyslová revoluce se stala historicky důležitým zlomem v průmyslu v českých zemích. Vynález parního stroje způsobil rozmach hutnictví, strojírenství a dopravy. Následně po vzniku samostatné ČSR v roce 1918 se zde průmysl rozvinul natolik, že se tehdejší Československo mohlo řadit mezi průmyslově nejrozvinutější státy světa.

Průmysl v České republice tvoří i dnes významné odvětví naší ekonomiky. Reprezentuje 35% českého hospodářství (služby tvoří cca 62% a zemědělství cca 3%) a zaměstnává přes 40% všech ekonomicky aktivních obyvatel České republiky. Průmysl chemický, hutnický, strojírenský a potravinářský patří mezi hlavní odvětví průmyslu v Česku. Mezi další významná odvětví lze zařadit průmysl energetický a stavební. Méně významné odvětví, ale s dlouholetou tradicí, je sklářství.

Technologie obrábění zaujímá ve strojírenské výrobě velmi významné místo. Umožňuje v mnoha technologických procesech vytvořit z polotovaru výrobek požadovaného tvaru, požadované rozměrové přesnosti a jakosti obrobených ploch. Z hlediska technologie obrábění lze obrobiteľnost definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Obrobiteľností materiálu se rozumí souhrn faktorů charakterizujících daný materiál, které mají vliv na výkon a náklady při jeho obrábění. Obrobiteľnost materiálu je dána jeho teplotou tání, elektrickou vodivostí, odolností proti elektrické erozi, vzájemnou vazbou atomů a molekul apod.

K objektivnímu posouzení obrobiteľnosti se užívá několik metod. Při nich je sledována dosažitelná řezná rychlost pro dané podmínky, řezný odpor vznikající při obrábění, příkon potřebný pro obrábění, teplota bříty, jakost obrobené plochy a další parametry.

V posledních desetiletích stále více nabývají na významu obráběcí technologie, které se svým principem činnosti odlišují od klasického třískového obrábění. Postupný vývoj a neustálé zdokonalování těchto nekonvenčních technologií umožňuje jejich rostoucí uplatnění v mnoha průmyslových oborech. I když pozice třískového obrábění ve výrobě není v porovnání s nekonvenčními technologiemi nijak ohrožena, klasické metody

třískového obrábění se k opracování např. těžkoobrobitelných materiálů nedají vždy použít. Nové technologie tak klasické metody nenahrazují, jen je vhodně doplňují.

Nekonvenční technologie obrábění využívají jiného fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu než klasické třískové obrábění. Ve většině případů se jedná o bezsilové působení na obráběný materiál, a to bez vzniku klasických třísek, které jsou známe z obrábění řeznými nástroji. Souhrnný název nekonvenční technologie v sobě skrývá technologie, které na rozdíl od klasického třískového obrábění nepoužívají pro úběr materiálu mechanické práce. Mezi nejvíce užívané nekonvenční metody patří elektroerozivní obrábění, elektrochemické obrábění, obrábění laserem, obrábění plazmovým paprskem, obrábění paprskem elektronů, chemické obrábění, obrábění ultrazvukem a obrábění vodním paprskem. [1, 10]

1 HISTORIE OBRÁBĚNÍ

Obrábění kovů má velmi dlouhou historii, protože je spojeno se samotnými počátky lidské civilizace. V té době se jednalo o ruční obrábění, zejména dřeva a kamene. V podstatě lze v prehistorii moderního obrábění kovů hovořit o dvou základních liniích. Je to obrábění kovů, jehož počátky jsou spojeny s prvním používáním kovů lidmi a obrábění dřeva, které v té době bylo v podstatě univerzálním konstrukčním materiálem. Zatímco při obrábění kovů se používalo téměř výhradně ručních nástrojů, např.: sekáčů, pilníků, vrtáků, průrazníků apod., při obrábění dřeva se postupně začaly uplatňovat pomocné mechanismy - předchůdci obráběcích strojů - to byly první soustruhy, vrtačky a pily.

Dvě technologie byly nejdůležitější pro počátky strojního obrábění – vrtání a soustružení. Vrtání je považováno za jednu z nejstarších technologií a smyčcová vrtačka byla vynalezena již v době kamenné. Po staletí zůstávalo vrtání jen ručním typem obrábění. První pokrok nastal v 15. století, kdy byla představena vrtačka na dřevo s klikovým mechanismem. Na počátku 17. století byl vynalezen vyvrtávací stroj, který byl poháněn vodním kolem.

V Evropě byly první obráběcí stroje vyrobeny již ve středověku, ve 14. století, kdy u nás byl objeven střelný prach. Tehdejšími úkolem řemeslníků bylo vynalezení takového válečného zařízení, kterým by se dala tato energie co nejlépe využít. Tím zařízením se stala děla a první výrobci dělových hlavních byli slévači zvonů. Brzy však poznali, že nevystačí pouze se starými vědomostmi a pomůckami. Pro správnou funkci děl, bylo potřeba jejich vnitřky přesně opracovat. K tomu bylo potřeba vynalézt vhodné obráběcí stroje, nejprve vrtačky a poté soustruhy.

Své příslušné místo v pozdějším rozvoji obráběcích strojů zaujaly i frézky se svými nástroji frézami. Na konci 18. století byly zhotoveny první frézy, které se používaly hlavně v zámečnictví a pro různé pilovací práce. Na začátku 19. století vznikl první frézovací stroj a tato frézka již měla všechny základní části těch dnešních. Nejstarší frézka však v době svého vzniku nebyla řádně oceněna a nedošlo k jejímu upotřebení a využití. Tato popsaná situace byla velmi častá a v průběhu několika století vznikla v tomto oboru řada konstrukčních nápadů, které se věnovaly obrábění kovů, avšak jen malé procento z nich bylo využito v praxi. Zbývající nápady často upadly do zapomnění, takže pozdější konstruktéři je musejí znovu nalézt.

První univerzální frézka byla zkonstruována v roce 1862. Byla určena hlavně pro výrobu šroubových vrtáků, jejichž drážky se v té době pilovaly. Frézováním se dosáhlo větší přesnosti a výroba se tak značně zrychlila. Díky této první univerzální frézce byl zahájen rychlý vývoj konzolových frézek. Tato univerzální frézka již měla všechny podstatné znaky novodobých frézek a na tehdejší dobu se vyznačovala velmi úhlednou a účelnou konstrukcí. V technické praxi se frézky dočkaly většího uplatnění až v roce 1867 po skončení světové výstavy v Paříži.

Další vývoj probíhal podobně jako u ostatních obráběcích strojů, byl však urychlen v 19. století zbrojní technikou a vynálezem parního stroje. O další rozvoj se v následujícím století zasloužily zejména automobilismus a letectví.

Obráběcí stroje se postupem času dostaly na tak vysoký stupeň vývoje, že se od nich požadovalo, aby jejich výrobky byly zhotovovány s přesností na setiny až tisíce milimetru. V roce 1874 to zajistila univerzální bruska pro broušení do kulata. Obráběcí i frézovací stroje byly neustále zdokonalovány. Rychlořezné oceli měly největší vliv na jejich celkovou konstrukci, které byly zavedené do výroby okolo roku 1900. S postupným rozvojem průmyslu se frézy staly naprosto nepostradatelnými ve většině odvětví stavby strojů. Plochy vytvořené frézováním se vyznačují velmi dobrou jakostí povrchů a frézované výrobky zpravidla nepotřebují žádné zvláštní dokončovací práce. [11, 12, 13]

2 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Název nekonvenční metody obrábění se z dnešního hlediska jeví jako nepřesný, protože dnes jsou v mnohých případech např. elektrochemické a elektrotepelné procesy obrábění materiálů běžnou součástí průmyslového zpracování materiálů.

Vzhledem k neustálému vývoji nových materiálů a zlepšování jejich vlastností jsou netradiční způsoby obrábění v mnohých případech jedinou možností progresivní výroby.

Mezi hlavní důvody rozšiřování nekonvenčních technologií patří:

- růst nároků na konstrukci strojních součástek,
- rostoucí nároky na tvarovou složitost střižných a tvářecích nástrojů,
- vysoké nároky na tvarovou složitost řezných nástrojů z rychlořezné ocele a slinutých karbidů,

- vysoké požadavky na komplexnost obráběných tvarů forem a zápustek na tváření,
- rostoucí nároky na výrobu přesných miniaturních součástek,
- rostoucí nároky na produktivitu a na vytvoření předpokladů pro zavedení automatizace a automatizovaných výrobních systémů do výše uvedených oblastí výroby.

Nekonvenční technologie obrábění jsou založeny na využití fyzikálního, elektrického nebo chemického principu úběru materiálu. Na rozdíl od mechanických způsobů obrábění, spojených s úběrem materiálu ve formě třísek se tyto technologie se vyznačují úběrem materiálu většinou působením tepelných, chemických, elektrických, elektro-chemických a jiných, případně i kombinací pochodů, za téměř bezsilového působení na obráběný materiál, navíc bez tvoření třísek vznikajících u běžných metod obrábění. [5, 8, 9, 26]

Charakteristika nekonvenčních technologií

- rychlost a výkonnost obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu
- materiál nástroje nemusí být tvrdší a pevnější než obráběný materiál
- možnost obrábění složitých tvarů
- možnost zavedení plné automatizace
- možnost zvýšení technologičnosti konstrukce, sériovosti výroby a snížení pracnosti výroby
- současně s výrobou dochází někdy k cílené změně vlastností povrchové vrstvy (odolnost proti korozi, pevnosti apod.)

Obrobitelnost materiálů většinou není limitovaná mechanickými vlastnostmi, jako je tvrdost a pevnost, ale je především závislá na fyzikálních vlastnostech, kterými jsou teplota tavení, tepelná vodivost, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost, chemické složení a podobně.

Mezi základní nedostatky nekonvenčních metod obrábění patří především malá produktivita vlastní výroby. Určité problémy v zavádění nekonvenčních technologií přináší i vysoká pořizovací cena kvalitních obráběcích strojů a vysoká energetická náročnost určitých výrobních způsobů. [5, 9, 10]

Podle převládajících účinků oddělování materiálů se dělí na:

a) Oddělování materiálu tepelným účinkem:

- Elektroerozivní metody obrábění (Elektro Discharge Machining – EDM)
- Obrábění paprskem plasmy (Plasma Beam Machining – PBM)
- Obrábění paprskem laseru (Laser Beam Machining – LBM)

b) Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem:

- Elektrochemické obrábění (Elektro Chemical Machining – ECM)
- Chemické obrábění (Chemical Machining – CM, CHM)

c) Oddělování materiálu mechanickým účinkem:

- Ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – USM)
- Obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM, Abrasive Water Jet Machining – AWJM). [9, 10]

Tab. 1 – Vhodnost operací pro nekonvenční technologie [1]

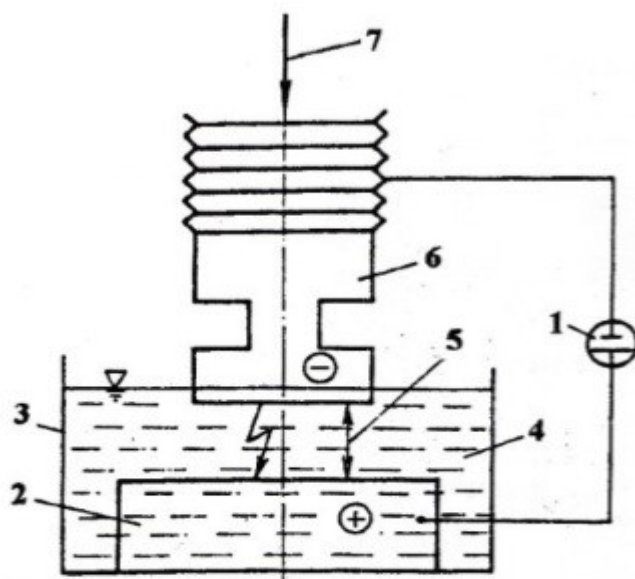
Obrábění	Operace
Ultrazvukem	Výroba malých předmětů, děr a dutin libovolného tvaru
Elektrochemické	Hloubení děr a dutin libovolného tvaru a velikosti, opracování drobných součástek, leštění, broušení, odstraňování otřepů
Elektroerozivní	Děrování, výroba drážek a zápichů, vyvrtávání, obrábění tvarových ploch, odstraňování otřepů
Chemické	Hloubení děr a dutin libovolných velikostí a tvarů, leštění, odstraňování otřepů, značkování
Laserem	Tvarové řezání, děrování, výroba drážek, obrábění tvarových ploch, opracování drobných součástek, vrtání miniaturních děr
Plazmou	Tvarové řezání a děrování, výroba drážek, obrábění tvarových ploch, hloubení děr a dutin libovolného tvaru
Svazkem elektronů	Opracování drobných součástek, děrování, výroba drážek a zápichů, tvarové řezání
Proudem kapaliny	Tvarové řezání, broušení, leštění, výroba drážek a zápichů, děrování

2.1 Elektroerozivní obrábění

Podle normy ISO nazývané jako Elektro Discharge Machining (EDM). Nejdůležitější podmínkou pro její aplikaci je, aby obrobek byl z vodivého materiálu. Tato nekonvenční metoda obrábění zahrnuje řadu metod, jejímž charakteristickým znakem je, že úběr materiálu je vyvolán periodicky se opakujícími elektrickými výboji mezi nástrojem (katoda (-)) a obrobkem (anoda (+)), ponořených do dielektrické kapaliny, čímž dochází k roztavení mikroskopických částeczek materiálu obrobku a díky jejich následnému vyplavení a odstranění z prostoru obrábění dochází k dělení nebo opracování obrobku do požadovaného tvaru nebo rozměru (obr. 2.1). Při procesu obrábění na obrobek nepůsobí žádné síly. Metoda si našla uplatnění v:

- leštění povrchu,
- hloubení dutin,
- elektrokontaktní obrábění,
- elektroerozivním mikroděrování,
- elektroerozivním řezání drátovou elektrodou,
- dále pro výrobu záпустek, průvlaků, průstřižnic, opracování slinutých karbidů a pro výrobu děr trysek spalovacích motorů.

Největší výhodou této metody je skutečnost, že ji lze použít tam, kde všechny ostatní selhávají, a to zvláště při obrábění problematických materiálů, tvarů a v neposlední řadě i velmi přesných rozměrů. Tvrdost materiálu není pro účinnost této metody tak určující, jako jeho vodivost, teplota tavení a kvalita. Touto metodou obrábění lze dosáhnout přesnosti až v řádu tisícín milimetru a drsnosti Ra 0,2, což znamená, že v praxi tato metoda může nahradit i broušení a to zejména v místech, kde je to jinak technologicky vyloučené. Výhodou je, že všechny elektroerozivní stroje jsou už v základu vybaveny čtyřosým obráběním, což umožňuje výrobu tvarů, které si při zvolení konvenční technologie obrábění vyžádají jiné technologické postupy, konstrukci výrobků i mnohem delší čas, nebo jsou téměř nevyrobitelné. Proces obrábění je vždy prováděn ve vodní lázni nebo dielektriku, které je nutno filtrovat od částeczek odstraněného materiálu. [1, 9, 10, 18, 28]



1 – generátor; 2 – obrobek; 3 – pracovní vana;
4 – pracovní kapalina; 5 – pracovní mezera;
6 – nástrojová elektroda; 7 – posuv nástrojové elektrody

Obr. 2.1 – Princip elektroerozivního obrábění [9]

Výhody:

- snadná automatizace procesu,
- výroba tvarových součástí, snižuje se pracnost při jejich výrobě,
- velmi přesná metoda,
- možnost obrábění vodivých materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti,
- velký rozsah pracovních parametrů.

Nevýhody:

- nízká produktivita při obrábění měkkých materiálů,
- nepřímá úměra mezi produktivitou obrábění a jakostí povrchu obrobene plochy,
- nutnost ponoření obrobku do dielektrika v průběhu obrábění,
- nutnost odvádět nebezpečné výpary vznikající při obrábění. [9, 15, 18, 33]

2.2 Obrábění paprskem plazmy

Obrábění pomocí paprsku plazmy patří k běžným způsobům opracování materiálů, hlavně kovů. Až v posledních deseti až patnácti letech však došlo k rozšíření této metody.

Metoda je podle normy ISO označována PBM, t.j. Plasma Beam Machining. Plyny zahřáté na teploty vyšší než několik tisíc stupňů Celsia tvoří čtvrté skupenství hmoty, a tím je právě plazma. Hmoty v tomto stavu se některými vlastnostmi podobá plynnému skupenství. Princip obrábění paprskem plazmy spočívá v tavení řezaného materiálu extrémně vysokou teplotou (více než 15 000 °C). Takto vysoká teplota je vytvářena rozkladem molekul plynu při průchodu elektrickým obloukem, který hoří mezi netavící se elektrodou (katoda -), která je vyrobena z wolframu, a řezaným materiálem (anodou +).

Každé technologické zařízení pracující s plazmatem tvoří:

- řídicí jednotka,
- plazmový hořák,
- zdroj elektrického proudu,
- manipulační zařízení, tj. souřadnicový pracovní stůl, manipulátor nebo robot.

Provedení hořáku s plynovou stabilizací může být:

- *s transferovým obloukem* – elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a obráběným materiálem. Použití pro elektricky vodivé materiály, zejména pro řezání ocelí a neželezných kovů.
- *s netransferovým obloukem* – elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a výstupní tryskou, která tvoří anodu. Použití pro obrábění elektricky nevodivých materiálů (např. keramiky) a k nanášení povlaků.

Používané plyny:

- plazmové plyny – jednoatomový argon nebo dvouatomové plyny vodíku, dusíku, kyslíku a vzduchu,
- fokusační plyny – argon, dusík nebo směs argonu a vodíku, popř. argonu a dusíku,
- asistentní plyny – argon a dusík.

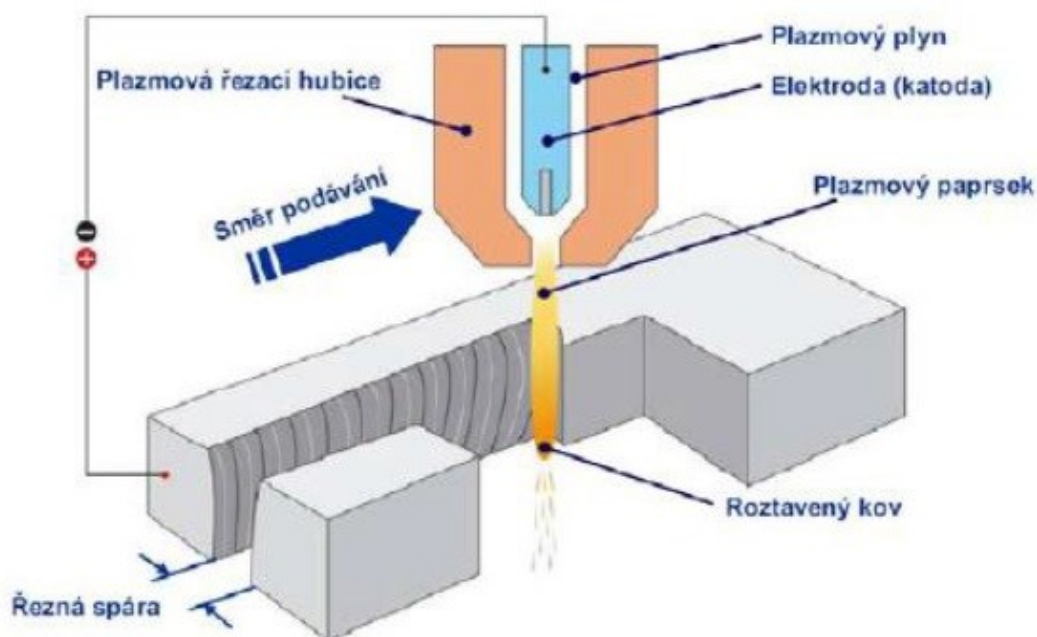
Volba plazmového a asistentního plynu je závislá na typu řezaného materiálu a na jeho tloušťce.

Výhody řezání plazmatem:

- možnost řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem,
- proces lze plně automatizovat,
- možnost provozu jednoho nebo více hořáků podle velikosti výrobní dávky,
- řezání plazmou pod vodou pro velmi malé tepelné ovlivnění řezaného materiálu a malou hladinu hluku v okolí pracoviště
- vysoká řezná rychlost (až 10x vyšší než při řezání plamenem)
- vhodnost zejména pro řezání slabých a středních tlouštěk konstrukční oceli (do 30 mm).

Nevýhody řezání plazmatem

- omezení použití do 160 mm tloušťky materiálu u suchého řezání a 120 mm u řezání pod vodou,
- širší řezná spára oproti řezání laserem. [1, 9, 16, 17, 19, 28]



Obr. 2.2 – Princip řezání plazmou. [9]

2.3 Obrábění paprskem laseru

V technické praxi se tato metoda označuje jako LASER BEAM MACHINING – LBM. Slovo Laser je složené z počátečních písmen anglického názvu popisující jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což by se mohlo přeložit jako zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření. Laser pracuje na principu indukované emise, tzn. vynuceného záření. Indukovaná emise je vyvolána dopadem záření na atom prvku, kdy záření donutí elektron obíhající kolem jádra přijmout energii a tím vystoupat na vyšší oběžnou dráhu. Při opětovném přestupu elektronu na nižší energetickou hladinu dojde k vyzáření (emisi) kvanta energie ve formě fotonů. Tyto fotony následně interagují s dalšími elektrony inverzní populace, čímž spouštějí tzv. stimulovanou emisi fotonů, se stejnou frekvencí a fází i u nich.

Tato metoda je založena na využití fotonové eroze nebo na rozkladu a odstraňování obráběného materiálu v důsledku tepelného působení soustředěného laserového záření. Přeměnou energie záření na energii tepelnou se místo dopadu zahřeje na teplotu přibližně 10^4 °C a okamžitě se roztaví a vypaří (obr. 2.3).

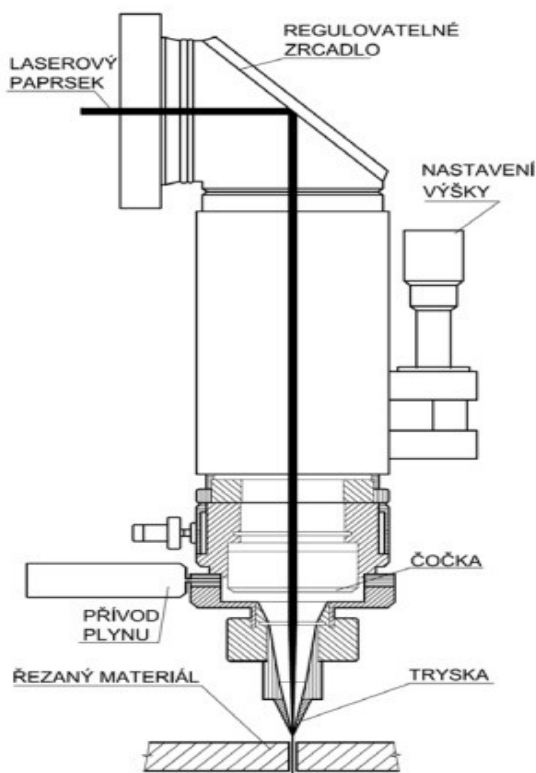
Laserový paprsek našel největší uplatnění při tvarovém dělení tenkých deskovitých materiálů. V současnosti je nejefektivnější používání laseru v kombinaci s konvenčními obráběcími stroji. Největší uplatnění našla kombinace mechanického řezání přesných jednoduchých otvorů a přesného laserového řezání komplikovaných tvarů.

Hlavní výhody této metody jsou:

- možnost řezání ve všech směrech,
- možnost řezat rovinné i prostorové tvary,
- tloušťka řezaného materiálu může být až 25 mm,
- nedochází k silovému ovlivnění obrobku,
- velmi vysoká přesnost cca 0,05 – 0,1 mm na jeden metr délky řezu, drsnost řezných ploch až Ra 1,6,
- je zde malá šířka tepelného ovlivnění a možnost řezání téměř všech technických materiálů (velmi měkké, velmi tvrdé, vrstevnaté i poddajné materiály).

Hlavní nevýhody:

- drahá zařízení,
- bezpečnostní rizika,
- vznik plynů, výparů – nutný odtah z pracoviště. [1, 9, 17, 24, 28, 35]

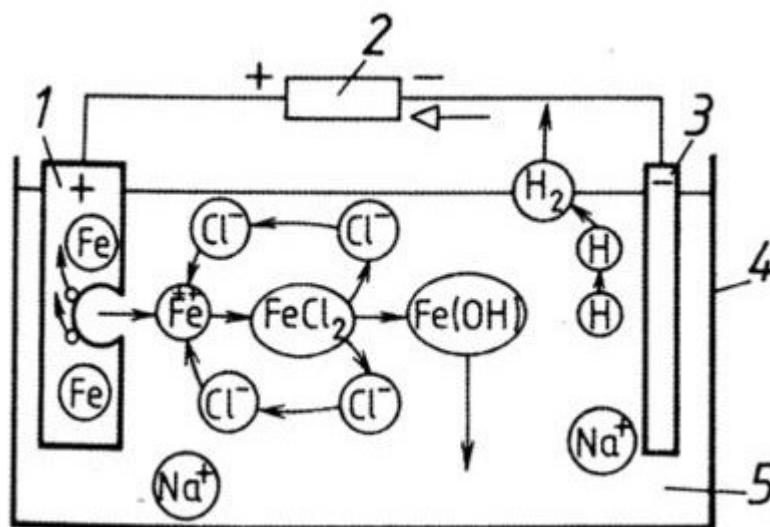


Obr. 2.3 – Řezací hlavice pro obrábění paprskem laseru. [9]

2.4 Elektrochemické obrábění

Nazývá se ELECTRO-CHEMICAL MACHINING (ECM). Základní principem tohoto progresivního způsobu obrábění je využití poznatků o působení elektrického proudu na kapalný vodič – elektrolyt. Tento uvedený fyzikální jev je označován jako elektrolýza. Hlavní zákonitosti elektrochemického obrábění jsou dány Faradayovými zákony. Podstatou ECM je řízené elektrolytické rozpouštění materiálu obrobku lokalizované na obráběnou plochu (obr. 2.4.1). Při této metodě obrábění anodickým rozpouštěním se přechodem jednosměrného proudu elektrolytem obráběná plocha (anoda) rozpouští a tvar nástroje (katoda) se kopíruje do obrobku. Měrný úběr materiálu je závislý na pracovní

mezeře mezi nástrojem a obrobkem, jejím udržením na stále stejné vzdálenosti (cca 0,05 – 1 mm), na teplotě, rychlosti proudění a na složení elektrolytu.



Obr. 2.4 – Princip elektrochemického obrábění

1 – obrobek (anoda), 2 – napájecí zdroj, 3 – nástroj (katoda), 4 – pracovní vana, 5 – elektrolyt

Tato metoda obrábění se využívá v mnoha směrech:

- obrábění s nuceným odstraňováním produktů vzniklých chemickými reakcemi:
 - obrábění proudícím elektrolytem:
 - hloubení tvarů a dutin zápusťek a forem,
 - dělení materiálů
 - hloubení otvorů malých průměrů,
 - odstraňování otřepů,
 - s mechanickým odstraňováním:
 - broušení,
 - lapování,
 - honování,
- povrchové obrábění bez odstraňování produktů vzniklých chemickými reakcemi:
 - leštění,
 - povrchové značení.

Touto metodou lze obrábět pouze vodivé materiály. [9, 18, 28]

2.5 Chemické obrábění

Pro chemické obrábění se v praxi používá název CHEMICAL MACHINING (CM). Podstatou chemického obrábění je řízené odleptávání vrstev materiálu a tloušťce od několika setin mm do několika mm z povrchu obrobku. V současné době se v praxi uplatňují dvě metody:

- chemické obrábění – leptání,
- termické odstraňování otřepů.

Chemické obrábění – leptání – je řízený úběr vrstvy materiálu z povrchu obrobku chemickou reakcí vznikající mezi materiálem obrobku a nástrojem, který tvoří chemická látka, nejčastěji kyselina nebo hydroxid. [9, 18, 28]

2.6 Ultrazvukové obrábění

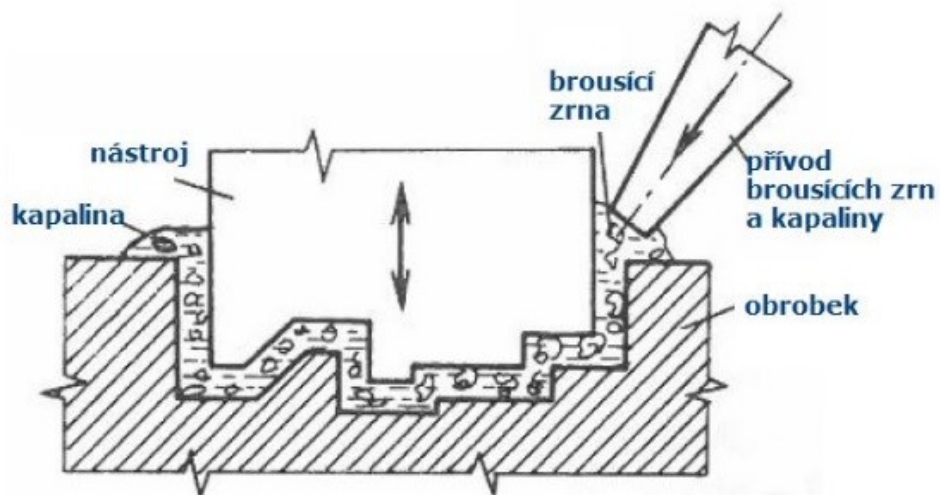
V technické praxi je tato metoda známá jako ULTRASONIC MACHINING (USM). Obrábění ultrazvukem je řízené rozrušování materiálu obrobku pohybem zrn abrazivního materiálu a působením kavitační eroze.

Princip obrábění je založen na úběru materiálu abrazivním účinkem brusiva rozkmitaným ultrazvukem. Zrna abrazivního materiálu jsou přiváděna mezi povrch obráběného materiálu a nástroj, který kmitá kolmo k obráběnému povrchu kmity o frekvenci 18 až 25 kHz. Řízenou stálou silou jsou zrna nástrojem přitlačována na obráběný povrch, čímž dojde k překopírování požadovaného tvaru nástroje do obrobku. Vysokou kinetickou energii dodává brusným zrnům tzv. magnetostrikční hlava, která je spojena s nástrojem. Mezi nástroj a obrobek jsou brusná zrna přiváděna v suspenzi.

Obrábění ultrazvukem je vhodné zejména pro:

- hloubení dutin – používá se zejména pro obrábění skla a keramiky,
- řezání – pro řezání tyčí z křemene, rubínu a dalších tvrdých materiálů o tloušťce do 5 mm,
- broušení rovinných ploch – úběr materiálu se provádí buď jako broušení s volným brusivem, nebo broušení s vázaným brusivem,

- hloubení průchozích otvorů – nástroj je ve tvaru trubky a tloušťka obrobku je maximálně 8 – 10 mm. [1, 9, 19, 33]



Obr. 2.6 – Princip obrábění ultrazvukem

2.7 Obrábění paprskem vody

Názorné a principiální dělení proudů kapaliny uvádí tab. 2.7.1

Tab. 2.7.1 – Rozdělení vodních paprsků

VODNÍ PROUD	Kontinuální	Spojitý	Čistý vodní paprsek
			Kryogenní vodní paprsek
		Kavitační	
		Abrazivní	Abrazivní vodní paprsek
			Abrazivní suspenzní paprsek
	Diskontinuální	Impulzní nízkofrekvenční	
		Vysokofrekvenční	

Obrábění vodním paprskem je známé pod označením WATER JET MACHINING (WJM). Obrábění vysokotlakým vodním paprskem se vyznačuje mnohými zajímavými přednostmi a výhodami, např. místo řezu je studené, čímž v místě řezu nevzniká tepelně ovlivněná oblast. Tato technologie je bezprašná, a tedy vysoce ekologická. Technologie je také velice univerzální díky vysokému stupni automatizace.

Vysokorychlostní vodní paprsek je moderní, efektivní a ekologický nástroj na obrábění širokého spektra materiálů. Použití vodních paprsků umožňuje odstranit nebo alespoň eliminovat nedostatky jiných metod. Mezi takové nedostatky patří zejména:

- omezená řezná rychlost,
- malá životnost nástroje a tvorba velkého množství třísek, které mohou při obrábění poranit operátora.

Řezání vodním paprskem umožňuje fakt, že k úběru materiálu dochází mechanickým účinkem dopadajícího úzkého vodního paprsku o vysoké rychlosti při určitém tlaku. Díky vysokému tlaku vody je po jejím průchodu tryskou vytvořen vodní paprsek. Při dopadu paprsku na obráběný materiál tak dochází ke koncentraci velké energie na malou plochu. Materiály je pak možno řezat vysokými rychlostmi, malá šířka řezu (0,3 mm) přitom zabezpečuje minimální ztráty materiálu. [1, 2, 3, 6, 9]

V následující kapitole bude detailně popsána jen jedna ze základních tří metod řezání vodním paprskem – abrazivním vodním paprskem, a také metoda řezání laserovým paprskem, neboť úzce souvisí s tématem mé diplomové práce.

3 Obrábění abrazivním vodním paprskem

3.1 Historie vodního paprsku

Ačkoli historie řezání vodním paprskem má své kořeny již v dávné minulosti, kdy člověk vodu a vodní energii využíval k nejrůznějším účelům, skutečný začátek této technologie sahá do 19. století, kdy v Kalifornii kolem roku 1870 zlatokopové používali tuto energii vody k odstranění nánosů písku a vrstev kamení (obr. 3.1). Jednalo se zatím jen o nízkotlaké systémy.



Obr. 3.1 – Fotografie těžby zlata na potoce Bonanza Creek, konec 19. století. [6]

I když se technologie řezání vodním paprskem rozvinula v polovině 20. století, širokého uplatnění dosáhla až v osmdesátých letech přidáním abraziva. Inženýr lesního hospodářství Dr. Norman Franz začal v padesátých letech dvacátého století experimentovat s různými formami vodního paprsku. Je tedy považován za otce vodního paprsku.

Technologie vodního paprsku je založena na generování vysokého tlaku kapaliny (zpravidla vody), která protéká tryskou o velmi malém průměru velmi vysokou rychlostí (až 3násobek rychlosti zvuku), čímž je dosaženo vysoké kinetické energie proudu.

V dnešní době existují tři typy vodního paprsku: čistý vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek a suspenzní vodní paprsek. Je zřejmé, že čistý vodní paprsek je bez přidání abrazivních částic, a je používán pro měkké materiály, jako jsou potraviny, plasty, pěnové materiály, dřevo, papír apod. [1, 4, 6, 25, 31]

3.2 Abrazivní vodní paprsek

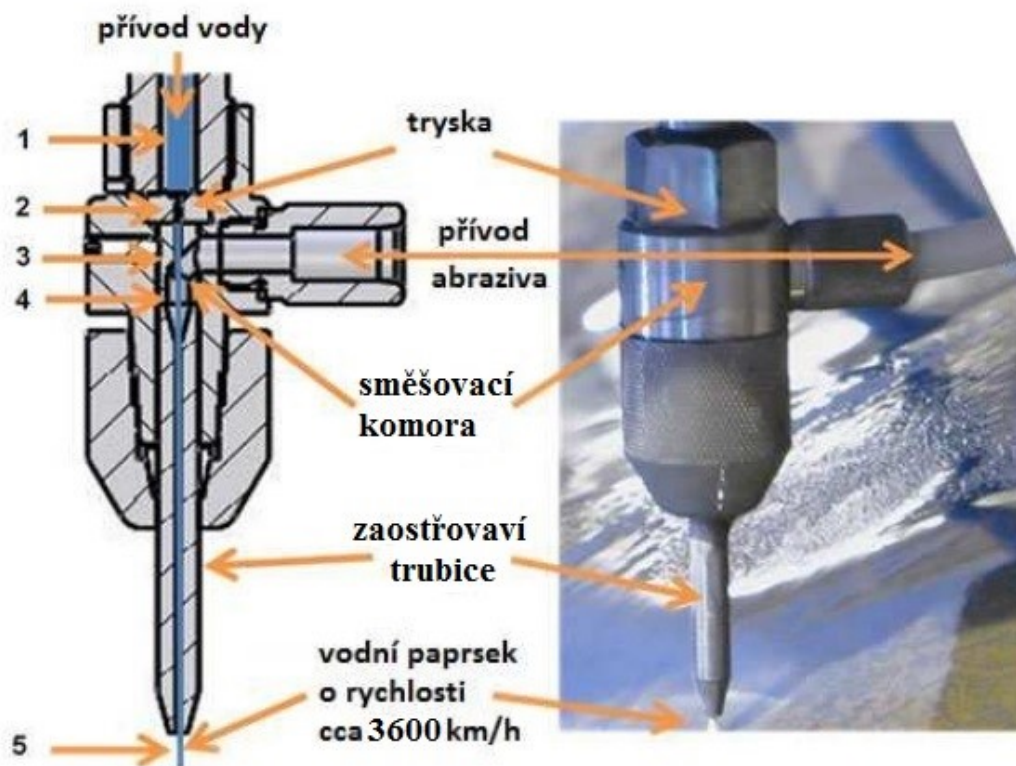
Výzkumy poukázaly na fakt, že přimícháním abrazivních částic do vysokorychlostního vodního paprsku rychle vzroste výkon řezání. Proto je abrazivní vodní paprsek směs vody a abraziva a tím je zvýšená účinnost řezání a mohou se řezat tvrdé materiály, např.: sklo, kov, kompozity, kámen, keramika apod. Abrazivo je strháváno vodou, která mu odevzdává část hybnosti.

Vysokorychlostní abrazivní vodní paprsek se vytváří dvěma způsoby:

- Abrazivní částičky jsou ze zásobníku abraziva přiváděny do směšovací komory, kde jsou strhávány vysokou rychlostí se pohybujícím vodním proudem (paprskem). Směs vody a abraziva je pak urychlována přes zaostřovací trubici. Tato metoda je známá jako AWJ, tj. Abrasive Water Jet.
- Systém s přímým vstřikováním – DIAJET tj. Direct Injektion Abrasive Jet. Abrazivo je mícháno s vysokotlakou vodou v tlakové nádobě a stlačená suspenze je přiváděna do trysky speciální konstrukce. Paprsek je známý pod zkratkou ASJ, tj. Abrasive Suspension Jet, nebo také Abrasive Slurry Jet.

Systémy se strháváním abrazivních částic (AWJ) se používají při tlacích od 70 do 400 MPa s množstvím abraziva desetin kg/min. Nejčastěji se jako abrazivo používá: granát, olivín, tříděný křemičitý písek, ocelová drť, nebo také částičky ledu, což je pak tzv. kryogenní vodní paprsek. Abrazivní zrna se používají o zrnitosti $0,1 \div 0,5$ mm. Přidáním abraziva do vodního paprsku se zlepší jeho řezné vlastnosti, zajistí se větší a efektivnější rozrušování a úběr materiálu obrobku.

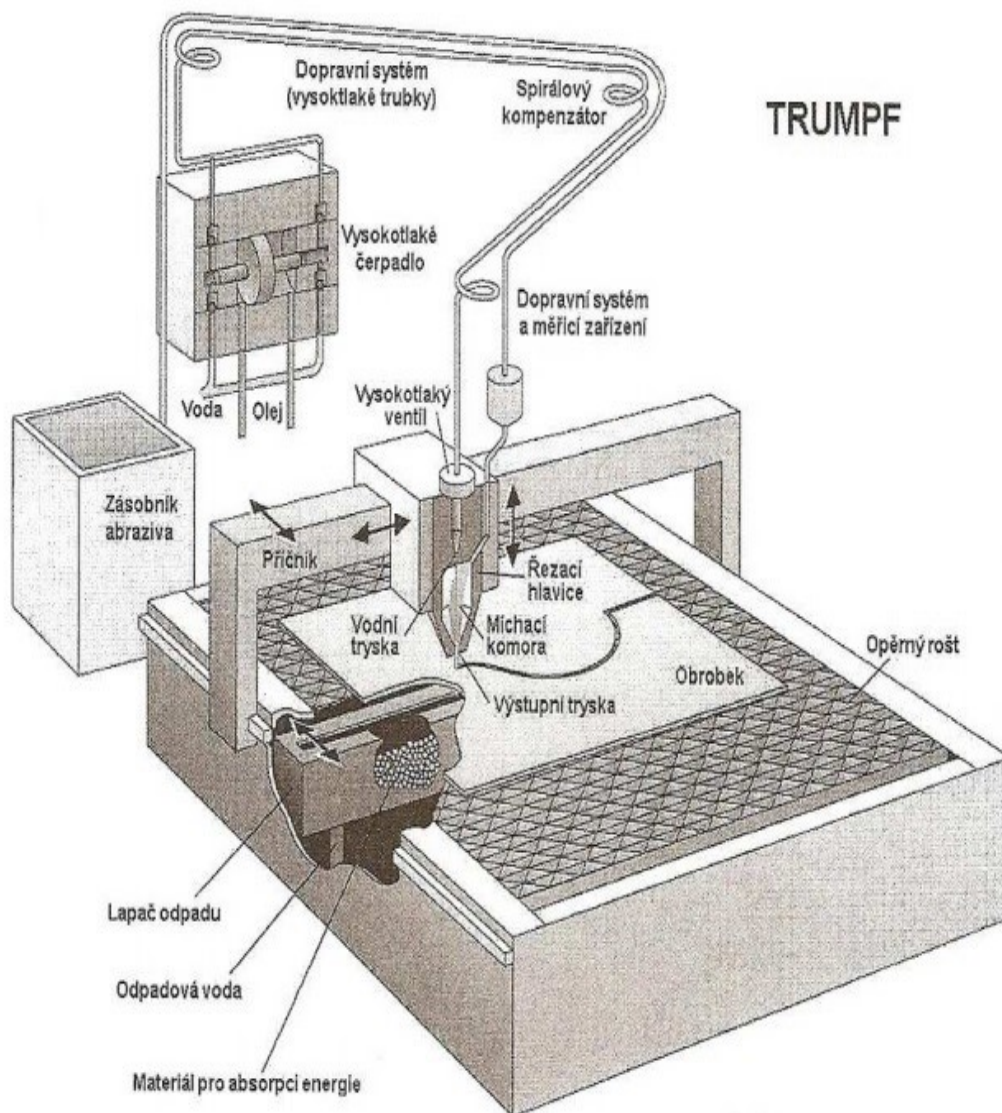
Abrazivo je umístěno v zásobníku, ze kterého je přesné množství přiváděno do směšovací komory. Podrobné schéma řezné hlavice uvádí obr. 3.2. [1, 10, 25, 27, 32, 35]



Obr. 3.2 Abrazivní řezná hlavice [9]

Přívod vysokotlaké vody (1) směřuje skrze vysokotlaké potrubí do trysky (2). Tryska utváří konečný tvar vodního paprsku. V okamžiku, kdy paprsek opustí trysku, pokračuje do směšovací komory (4), kde dochází k míchání přiváděného přesně dávkovaného abraziva a vodního paprsku. Paprsek vystupující z trysky je urychlen na velmi vysokou rychlost a vytváří podtlak ve směšovací komoře. Vytvořený podtlak pomáhá přisávat abrazivo ze zásobníku. Po smíchání vodního paprsku s abrazivem se směs vody, abraziva a vzduchu dostává do zaostřovací trubice a následně paprsek (5) opouští řeznou hlavici.

Důležitou součástí zařízení pro řezání abrazivním vodním paprskem je lapač směsi kapaliny s abrazivem, čímž je zajištěna bezpečnost, jelikož lapač zachycuje zbytkovou energii paprsku. Nejčastěji se používá alespoň 500 mm vysoká vodou naplněná nádrž, která musí být odolná proti opotřebení. Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem je uvedeno na obr. 3.3. [9, 20, 30, 34, 35]



Obr. 3.3 Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem. [35]

3.3 Abraziva a jejich složení

Abrazivo je do vodního paprsku přidáváno za účelem větší efektivity a zvýšení řezných schopností paprsku.

Různé druhy používaného abraziva mají různou tvrdost, měrnou hmotnost a tvar zrna, proto odlišně ovlivňují životnost trysky. Používané druhy abraziv mají také odlišné chemické složení:

1. GRANÁT Barton $\{\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3\}$

Chemické složení:	- oxid křemičitý (SiO_2)	41,34%
	- oxid železnatý (FeO)	9,72%
	- oxid železitý (Fe_2O_3)	12,55%
	- oxid hlinitý (Al_2O_3)	20,36%
	- oxid vápenatý (CaO)	2,97%
	- oxid hořečnatý (MgO)	12,35%
	- oxid manganatý (MnO)	0,85%

2. OLIVÍN 24 $\{\text{Mg}_2\text{SiO}_4\}$

Chemické složení:	- oxid hořečnatý (MgO)	47-48%
	- oxid křemičitý (SiO_2)	42-43%
	- oxid železnatý a oxid železitý $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$	do 8%
	- oxid hlinitý (Al_2O_3)	do 1%
	- oxid vápenatý (CaO)	do 0,5%
	- ostatní látky	do 1%

3. SILIKÁTOVÁ STRUSKA Al/Cu/ apod.

Složení závisí na typu strusky. [9, 29]

Různá abraziva jsou určena pro jiné aplikace a různé materiály. Abrazivo má vliv jak na výkon, tak i na jakost obrobené plochy.

Jak jsem již dříve uvedla, vhodné abrazivní materiály musí dosahovat maximálního řezného výkonu a musí mít minimální negativní dopad na pracovní a životní prostředí. Zrnitost daného abraziva se určuje podle tzv. **zrnitostní stupnice mesh**, která udává počet ok fiktivního síta na 1 palec (tab. 3.1), přes které může abrazivo propadnout. Obvyklá běžně používaná zrnitost granátového abraziva se pohybuje v rozmezí 80 – 120 mesh. Z níže uvedené tabulky vyplývá, že čím vyšší je hodnota mesh, je abrazivo jemnější. Čím je však zrnitost abraziva nižší, tím rychleji ztrácí rychlost i kinetickou energii. Nejvhodnější tvar pro abrazivní částice je přibližně kulovitý. [9, 29, 32, 34]

Velikost otvoru v sítu [mm]	MESH
1,000	16
0,417	36
0,250	60
0,188	80
0,150	100
0,106	150
0,063	250

Abrazivo může být uměle vyrobené nebo může být přírodní. V současné době je nejvíce využíváno abrazivo granát (obr. 3.4 – jeho chemické složení bylo uvedeno již dříve). Požitím tohoto abraziva se dosahuje vysoké produktivity. Mohou se používat také jiné druhy abraziva, např. korundový prášek, ocelová drť, diamantový prášek, smírek nebo olivín. Při řezání potravin se jako abrazivo používají krystalky cukru, soli nebo ledu. [29]



Obr. 3.4 Granát MESH 80 [29]

4 Obrábění paprskem laseru

4.1 Historie laserového paprsku

Počátky laseru nebyly nijak výrazné. V roce 1897 byl vynalezen Fabry-Perotův intereferometr, který je dodnes používán ve většině laserů.

Zprvu existovala Einsteinova teorie, že by za vhodných podmínek mohlo vzniknout světlo neobvyklého záření. Roku 1916 Albert Einstein na základě termodynamických a statistických úvah předpovídá možnost stimulované emise. Následně roku 1917 Albert Einstein jako první fyzikálně popsal princip laseru. V roce 1939 byla stimulovaná emise potvrzena R. Ladenburgerem a H. Kopfermannem a roku 1940 fyzik V. A. Fabrikant navrhl využít princip stimulované emise v plynném prostředí k zesílení světla, což je v podstatě princip laseru.

Cesta od objevu stimulované emise k laseru v takové podobě, jak ho známe dnes, vedla přes tzv. maser. Název maser pochází z počátečních písmen anglického názvu Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesilovač mikrovln pomocí stimulované emise záření. První maser, nebo také kvantový zesilovač, sestavil Charles Townes, J. P. Gordon a H. J. Zeiger v roce 1953. Tento prototyp však nebyl schopen fungovat nepřetržitě. Maser uvedený do provozu v roce 1956, generuje a zesiluje mikrovlnné elektromagnetické záření pomocí stimulované emise.

První koncept laseru byl popsán v roce 1958 a zasloužila se o něj dvojice Ch. H. Townes a A. L. Schawlow a samotný pojem laser zavedl o rok později G. Gould.

V roce 1960 T. Mainman poprvé získává emisi laserového světla, a to z umělého rubínového krystalu. V téže roce Ali Javan konstruuje plynový He-Ne laser s kontinuálním provozem. V roce 1963 C. Kumar N. Patel sestrojil výkonný plynový CO₂ laser.

V následujících letech se začaly objevovat další druhy laserů s různými druhy aktivních prostředí, výkonem a dalšími rozdíly. Postupem času se ukázalo, že v laserech je obrovský potenciál a lze je využít v mnoha oborech jako např.: ve vědě, průmyslu, medicíně, chemii, biologii apod. [19, 24, 36]

4.2 Laserový paprsek

Obrábění laserovým paprskem, jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, je označováno jako LASER BEAM MACHINING – LBM. Laserové obrábění je založené na využití fotonové eroze, nebo na rozkladu a odstraňování obráběného materiálu v důsledku tepelného působení soustředěného laserového záření. Někdy se laseru také říká kvantový generátor světla, ale tento název je používán zejména mezi vědci.

LASER má několik velmi významných vlastností, pro které je velmi hojně využíván. Tou nejhlavnější je koherentnost (uspořádanost) paprsku, který dokáže produkovat. To znamená, že světlo, které vydává, není jako třeba ze žárovky, které si šíří všemi směry a obsahuje velmi široké spektrum barev, ale laserové světlo se šíří jen v úzkém paprsku a je také monochromatické (jednobarevné), tzn. že obsahuje jen jednu barvu, a to podle aktivního prostředí ve kterém laserový paprsek vzniká a má velmi malou divergenci (rozbíhavost).

Zejména kvůli těmto, ale i dalším vlastnostem je LASER hojně využíván především pro veškeré měřičské práce na delší vzdálenosti, kde je potřeba dosáhnout velmi dobrých výsledků. Toto je zabezpečeno tím, že rozptyl paprsku laseru je mnohonásobně menší, než rozptyl světla oné žárovky. LASER má ale i jiná prvenství, jedno z nich je třeba to, že lasery jsou nejjasnějšími emitory světelného záření, nebo také se dá říct, že i nejostřejší. Lze s ním opracovávat i velice tvrdé materiály. Lze s ním dokonce svařovat i materiály dříve nesvařitelné. Lasery se dnes tedy dají využívat jako řezačky ocelových plátů, i několik desítek centimetrů silných. Jejich výkon je však závislý od použité technologie.

LASER je tedy světelné záření o velmi vysoké intenzitě, koherentnosti a určité vlnové délce. Vztahují se se na něj veškeré zákonitosti o šíření elektromagnetických polí dle teorie Jamese Clerka Maxwella. Laserové záření může mít několik barev a také několik vlnových délek, které záleží především na použité technologii, kterou lze rozdělit na dvě hlavní podskupiny. Tou první jsou pevnolátkové lasery, a tou druhou jsou plynové lasery. Jejich hlavní rozdíl je v použitém aktivním prostředí. V tomto prostředí vznikají laserová záření vzájemným srážením atomů, a předáváním své energie, což způsobuje excitaci atomů do vyšších vrstev. Když se tento atom poté vrací na svoji hladinu, vyzařuje záření (fotony), které nazýváme laserové záření. Toto záření pak má určitou vlnovou délku, která se dá vypočítat ze vzdáleností energetických hladin atomů. [7, 19, 24, 36]

Od spuštění prvního laseru uběhlo přes padesát let. Během této doby, zejména v šedesátých letech, se začaly objevovat další typy laserů, lišící se aktivním prostředím nebo konstrukčním uspořádáním. Vznikaly také lasery s dalšími vlnovými délkami v oblasti viditelného, ultrafialového, infračerveného, a dokonce i rentgenového záření. Každý z těchto typů laserů našel uplatnění v jiné oblasti lidské činnosti. Ne každý laser se totiž hodí pro každý účel. [19, 24, 36]

Základní typy laserů:

Lasery lze rozdělit podle různých kritérií. [19, 24, 36]

Podle povahy aktivního prostředí rozlišujeme lasery:

- pevnolátkové (rubín, skla, keramika),
- polovodičové,
- plynové (atomární, molekulové, iontové),
- chemické,
- kapalinové,
- lasery využívající svazky nabitých částic.

Podle způsobu čerpání energie lze lasery rozdělit na lasery čerpané:

- opticky (výbojkou, jiným laserem, slunečním světlem a radioaktivním zářením) pro pevnolátkové a kapalinové lasery,
- elektrickým výbojem (srážkami v elektrickém výboji, svazkem nabitých částic, injektáží elektronů, interakcí elektromagnetického pole se shluky nabitých částic) pro plynové lasery,
- chemicky (energií chemické vazby, fotochemickou disociací, výměnou energie mezi molekulami a atomy),
- termodynamicky – tepelnými změnami (zahřátím a ochlazením plynu),
- jadernou energií (reaktorem, jaderným výbuchem),
- rekombinací (polovodičové),
- elektronovým svazkem,
- injekcí nosičů nábojů.

Z hlediska režimu práce mohou lasery pracovat:

- kontinuálně (spojitě, nepřetržitě),
- impulzně (dlouhé, krátké, velmi krátké),
- pulsně.

Lasery můžeme dělit také podle vyzařované vlnové délky na:

- infračervené,
- ultrafialové,
- rentgenové,
- v oblasti viditelného světla.

Podle zúčastněných energetických hladin na kvantovém přechodu:

- elektronové,
- molekulární (rotační, rotačně – vibrační, vibrační).

Podle použití můžeme lasery dělit na:

- výzkumné,
- lékařské,
- měřicí,
- vojenské,
- technologické,
- energetické.

5 Metrologie a její význam

Metrologie má pro průmyslovou činnost velký význam, hlavně z pohledu jakosti a technického rozvoje.

Metrologie je vědní a technická disciplína, zabývající se všemi činnostmi a poznatky, týkajícími se měření, je základem jednotného a přesného měření ve všech oblastech vědy, hospodářství, státní zprávy, obrany, ochrany zdraví a životního prostředí. Metrologie jako

vědní obor se zabývá činnosti v oblasti měření různých veličin. Její význam je dán nutností poznání určitého stavu jevu, ať jde o experiment, bádání nebo výrobní proces. [21, 22, 23]

Základní kategorie metrologie:

- ***průmyslová metrologie*** (zabezpečuje jednotnost a správnost měření ve výrobě, zkušebnictví a zajišťuje činnosti spojené s kalibrací etalonů a pracovních měřidel),
- ***vědecká metrologie*** (zabývá se organizací a vývojem etalonů a jejich uchováním),
- ***fundamentální metrologie*** (je základem metrologického systému, zabývá se metodami měření, soustavou měřicích jednotek, realizací jejich etalonů a má charakter vědeckého výzkumu),
- ***legální metrologie*** (chrání občany před důsledky špatného měření v oblasti úředních a obchodních transakcí, pracovních podmínek, zdraví a bezpečnosti. Zabývá se stanovením zákonných měřicích jednotek, požadavků na měřidla, metodami měření a zkoušení). [21, 22, 23]

5.1 Základní pojmy a měření

Veškeré názvosloví a symbolika v celé metrologii je u nás normalizováno normou ČSN 010115 – mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii.

Veličiny a jednotky

Veličina – vlastnost jevu, tělesa nebo látky kterou lze kvalitativně určit (hmotnost, délka, teplota atd.).

Základní veličina – jedna z veličin, které jsou v určitém systému veličin konvenčně přijaty jako vzájemně nezávislé.

Jednotka – blíže určená veličina definovaná a přijatá konvencí, se kterou jsou porovnávány jiné veličiny stejného druhu za účelem vyjádření jejich hodnot ve vztahu k této veličině.

Základní jednotka – jednotka daného systému jednotek přijatá jako rozměrově nezávislá na ostatních jednotkách systému.

Značka jednotky – konvenční označení měřicí jednotky.

Mezinárodní soustava jednotek SI – systém jednotek přijatý a doporučený Generální konferencí vah a měr (CGPM). [21, 22, 23]

Měření

Měření – soubor experimentálních úkolů, jejichž cílem je určení hodnoty určité veličiny, tj. určení kvantitativní charakteristiky určitého kvalitativního znaku určitého objektu.

Metrologie – věda zabývající se měřením.

Měřená veličina – veličina, jejíž hodnota je předmětem měření.

Výsledek měření – hodnota získaná měřením přisouzená měřené veličině.

Přesnost měření – těsnost shody mezi výsledkem měření a pravou (konvenčně pravou) hodnotou měřené veličiny. [21, 22, 23]

5.2 Chyby a nejistoty měření

Opakuje-li se měření za stejných podmínek pak bude zjištěno, že výsledky měření se od sebe více či méně liší. Toto je způsobeno nepřesnostmi měřicího systému, nedodržením konstantních podmínek měření atd. **Každé měření je zatíženo chybou.**

Chyba měření (absolutní) je rozdíl mezi naměřenou a pravou hodnotou, udává se v jednotkách naměřené veličiny:

$$\varepsilon = y - x_0$$

kde: ε ... absolutní chyba

y ... naměřená hodnota

x_0 ... pravá (skutečná) hodnota

Cílem měření je určení skutečné hodnoty, což je možné jen určením chyby měření. Chyba je kladná, je-li naměřená hodnota větší než pravá (skutečná) hodnota a při odhadu skutečné hodnoty se od naměřené hodnoty odečítá.

Relativní chyba je poměr absolutní chyby měření a pravé hodnoty měřené veličiny:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{x_0} \text{ popř.: } \delta = \frac{\varepsilon}{x_0} \cdot 100[\%]$$

Hlavní příčiny vzniku chyb:

- měřidlo, měřicí systém (nedokonalosti a nespolehlivost měřících přístrojů, např.: chyby způsobené posunutím nuly, chyby umístění atd.),
- měřicí metoda (nerespektování dynamických vlastností měřidel, zanedbání některých funkčních závislostí – nepřímé měření),
- podmínky, při kterých se měření provádí (zvláště teplotní chyba),
- osoba, která měření provádí a vyhodnocuje (závisí na subjektivních vlastnostech osoby pozorovatele – zručnost, kvalifikace, zkušenost, psychický stav, omezená rozlišovací schopnost).

Členění chyb:

- dle časové závislosti: statické a dynamické,
- dle možnosti vyloučení: odstranitelné a neodstranitelné,
- dle způsobu výskytu: chyby hrubé, systematické a náhodné. [21, 22, 23]

5.2.1 Hrubé chyby

Hrubé chyby (označované také jako odlehlé nebo vybočující hodnoty) jsou způsobeny nesprávně provedeným měřením, nesprávnou manipulací s měřidlem, vadou přístroje, nesprávným způsobem zpracování, nesprávným odečtením údajů apod. Výsledek měření, který je ovlivněn hrubou chybou, je nepoužitelný. Naměřené hodnoty, které jsou zatíženy hrubou chybou, se ze souboru naměřených hodnot vylučují a nesmí se v měření pokračovat, pokud příčiny nebudou odstraněny. V určitých případech je možno toto provést až po otestování podezřelých naměřených hodnot, a to z důvodu možnosti, že rozhodnutí o vyloučení (nevyloučení) podezřelých hodnot ze souboru by mohlo být nesprávné. [21, 22, 23]

5.2.2 Systematické chyby

Systematické chyby zkreslují při opakovaném měření za stejných podmínek hodnotu měřené veličiny stále stejným způsobem a vznikají z příčin, které působí soustavně a jednoznačně co do smyslu a velikosti. Působení systematické chyby se dá zjistit změnou měřicích poměrů, např. jiným pozorovatelem, provedením měření na jiném přístroji, za jiných podmínek apod. Pokud bychom chtěli tyto chyby vyloučit, museli bychom použít přesnější přístroje, nebo zavést korekce.

Odhady chyby každého měření závisí na konkrétních podmínkách pokusu a experimentálních zkušenostech pozorovatele. [21, 22, 23]

Systematické chyby podle poznatelnosti dělíme na:

- zjistitelné – mají konkrétní znaménko a hodnotu, lze je použít ke korekci naměřené hodnoty,
- neznámé – nemají konkrétní znaménko, nedají se použít ke korekci naměřené hodnoty, zachází se s nimi jako s chybami náhodnými a zahrnují se do nejistoty měření.

Systematické chyby dále dělíme podle příčin výskytu na:

- chyby měřidla – vznikají při výrobě, činnosti a používání, jsou způsobené nepřesností výroby, změnou pracovních podmínek, jednotlivých funkčních elementů, nepřesností montáže, zjišťují se kalibrací nebo ověřováním,
- chyby měřicí metody – hlavní příčiny jsou nesprávná volba měřicí metody, vliv přitlačné síly, nesprávné umístění měřené součásti na směr měření, deformace atd.,
- chyby osobní – jsou způsobeny osobou, která provádí měření, příčiny jsou: neopatrnost, nedokonalost lidských smyslů, nevědomost, nepozornost atd.,
- chyby způsobené vlivem prostředí – prašnost, vlhkost, teplota, osvětlení, tlak atd.

5.2.3 Náhodné chyby

Na rozdíl od hrubých a systematických chyb, které mohou být správnou metodou měření, přesnými přístroji a pečlivostí práce odstraněny, se náhodné chyby vyskytují zcela zákonitě při každém měření a nejde je ovlivnit. Jsou způsobeny příčinami náhodného charakteru co do velikosti a směru působení. Na okolnostech měření závisí, jak se ke skutečné hodnotě veličiny přiblížíme.

Při opakovaném měření za stejných podmínek (metoda, osoba, měřidlo, prostředí apod.) bude soubor naměřených hodnot v důsledku působení náhodných chyb vykazovat rozptyl (velikost rozptylu je úměrná vlivu náhodných chyb). Vliv náhodných chyb nelze posoudit z jedné naměřené hodnoty, ale pouze ze souboru naměřených korigovaných hodnot je možno určit velikost náhodné chyby pomocí intervalu, ve kterém se bude nacházet s určitou pravděpodobností (jistotou) „skutečná“ hodnota naměřené veličiny.

Dva zákony statistického charakteru mohou vyjádřit obecné vlastnosti náhodných chyb:

- malé chyby jsou častější než chyby velké,
- chyby kladné jsou stejně četné jako chyby záporné (za předpokladu symetrického rozložení chyb).

Náhodné chyby mají při měření ve strojírenství nejčastěji Gaussovo (normální) rozdělení hustoty (četnosti) pravděpodobnosti výskytu. [21, 22, 23]

6 Hodnocení drsnosti povrchu

6.1 Základní pojmy

Žádný povrch není dokonale rovný. Struktura povrchu je členěna na jednotlivé složky podle rozteče příslušných nerovností. Jde o složku s nejmenší roztečí tvořící drsnost povrchu, dále složku zvanou vlnitost a poslední složku s největší roztečí nerovnosti určenou základním profilem. Podle normy ČSN EN ISO4287 jsou definovány tyto geometrické parametry:

- R pro drsnost povrchu,

- W pro vlnitost povrchu,
- P pro základní profil.

Základním zdrojem informace je profil neboli profilová metoda. Normou ČSN EN ISO4287 jsou definovány:

- **Profil povrchu** – průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.
- **Snímaný profil** – geometrické místo středů snímacího hrotu stanovených parametrů.
- **Referenční profil** – dráha, po které se snímač podél vedení pohybuje v rovině řezu.
- **Základní profil** – úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s . Reprezentuje základnu pro číslkové zpracování profilu pomocí filtru profilu a pro výpočet a hodnocení parametrů profilu.
- **Zbytkový profil** – základní profil získaný snímáním ideálně hladkého a rovného povrchu (optická rovina). Zbytkový profil se skládá z odchylek vedení, vnějších a vnitřních poruch a odchylek vzniklých při přenosu profilu.
- **Profil drsnosti** – profil odvozený ze základního profilu potlačením složek použitého filtru profilu λ_c . Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů drsnosti.
- **Profil vlnitosti** – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru λ_c na základní profil.

Filtrace

Filtrace je proces odstraňování nežádoucích složek profilu. Hodnota, která odděluje dlouhovlnné složky od krátkovlnných se nazývá mezní vlnová délka filtru – cut-off.

Filtry profilu

- **Filtr λ_s** – definuje rozhraní mezi drsností a krátkovlnnými složkami.
- **Filtr λ_c** – určuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti.
- **Filtr λ_f** – určuje rozhraní mezi složkami vlnitosti a delšími složkami přítomnými na povrchu.

Základní délka l_r – délka ve směru osy x používaná pro rozpoznání nerovnosti charakterizujících daný profil. Základní délka pro drsnost l_r je číselně rovna hodnotě filtru λ_c .

Vyhodnocovaná délka l_n – délka ve směru osy x používaná pro posouzení vyhodnocovaného profilu, vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu a více základních délek. [21, 22, 23]

6.2 Parametry drsnosti

Drsnost povrchu je jeden z nejdůležitějších parametrů tzv. integrity povrchu. Integritou povrchu je nazýván soubor vlastností povrchové vrstvy, která byla změněna technologickým procesem a má rozdílné vlastnosti vzhledem k základnímu materiálu. Na drsnosti povrchu do značné míry závisí přesnost chodu strojních součástí, jejich hlučnost, elektrická vodivost, přestup tepla, únavová pevnost, doba záběru, odolnost proti opotřebení, korozi, ztráty třením a další vlastnosti. Co nejpresnější a nejúplnější popis mikrogeometrie povrchu je základním předpokladem pro jakoukoliv klasifikaci povrchu nebo předpověď funkčního chování při daném způsobu zatěžování.

Souhrn odchylek od ideálního tvaru je možné klasifikovat do skupin dle velikosti a příčin vzniku:

- vlnitost (vzniká chvěním stroje, nástroje nebo nesprávným upnutím),
- drsnost – periodický profil (je ovlivněn zejména tvarem a geometrií břitu nástroje a řeznými podmínkami),
- drsnost – aperiodický profil (příčiny vzniku jsou v postupu vytváření třísky, povrchové úpravě, přetváření materiálu apod.),
- odchylky tvaru,
- strukturální změny (krystalické pochody, chemické účinky, korozní vlivy)
- mřížková stavba hmoty (běžnými metodami nelze měřit).

Profil nerovnosti je rozkládán na složky dle jednotlivých skupin. Tvar a vlnitost jsou označovány jako makrogeometrie a drsnost povrchu jako mikrogeometrie.

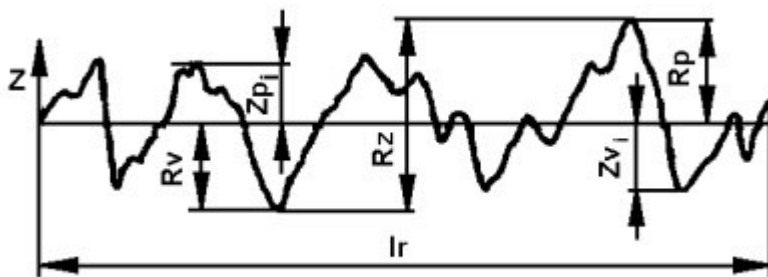
Mikrogeometrii (drsnost) povrchu ovlivňuje:

- řezné podmínky procesu obrábění,
- plastická deformace při tvorbě třísky,
- tření řezného klínu o obrobenou plochu,
- geometrie řezné části nástroje.

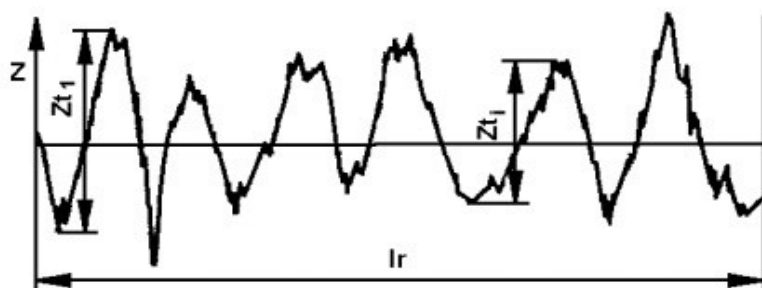
Většina měřicí techniky nedovoluje vyhodnotit drsnost na celé ploše, ale pouze na řezu kolmém k základnímu povrchu. [21, 22, 23]

6.2.1 Výškové parametry

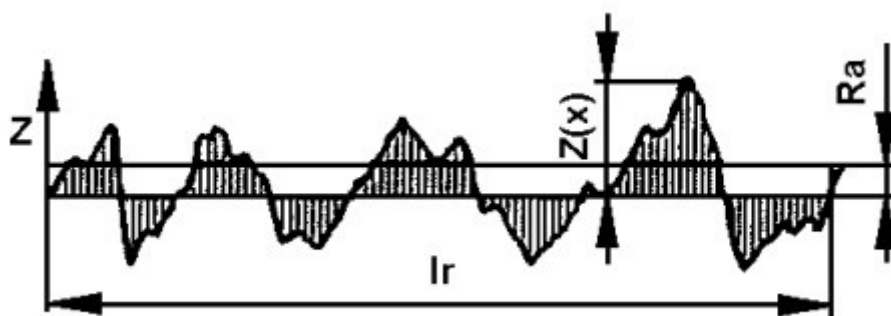
- **Největší výška výstupku profilu R_p** – výška Z_p největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky l_r (obr. 5.1).
- **Největší hloubka prohlubně profilu R_v** – hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r (obr. 5.1).
- **Největší výška profilu R_z** – součet výšky Z_p největšího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky l_r (obr. 5.1)
- **Průměrná výška profilu R_c** – průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky l_r . Měření R_c vyžaduje zadání jedné vertikální a horizontální hladiny řezu (obr. 5.2).
- **Celková výška profilu R_t** – součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky l_n .



Obr. 5.1 – Parametry R_v , R_p , R_z .

Obr. 5.2 – Parametry pro stanovení R_z .

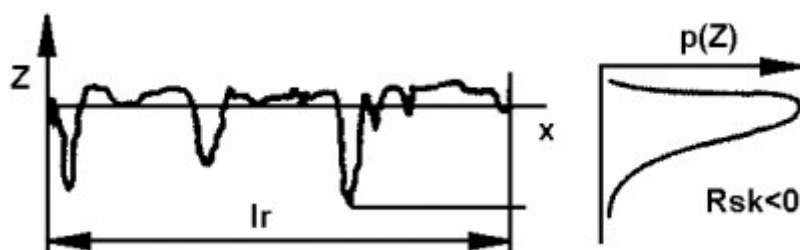
Střední aritmetická úchylka profilu R_a – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r (obr. 5.3). Vypovídací schopnost parametru R_a je nízká, R_a nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu.

Obr. 5.3 – Parametr R_a

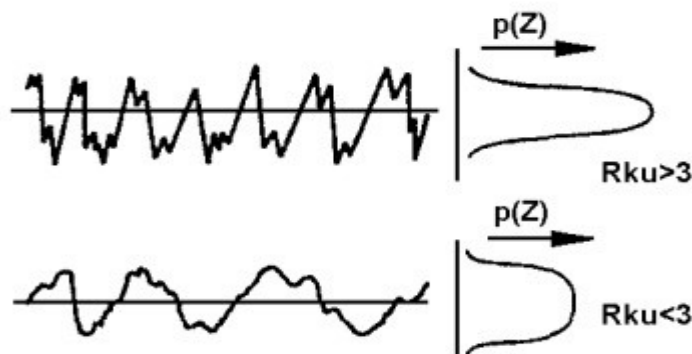
Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q – průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r (obr. 5.4). parametr R_q má význam při statistickém pozorování profilu povrchu, neboť zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic.

Obr. 5.4 – Parametr R_q

Šikmost posuzovaného profilu R_{sk} – podíl průměrných hodnot třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky l_r (obr 5.5). negativní hodnota R_{sk} odpovídá dobrým vlastnostem nosnosti profilu.

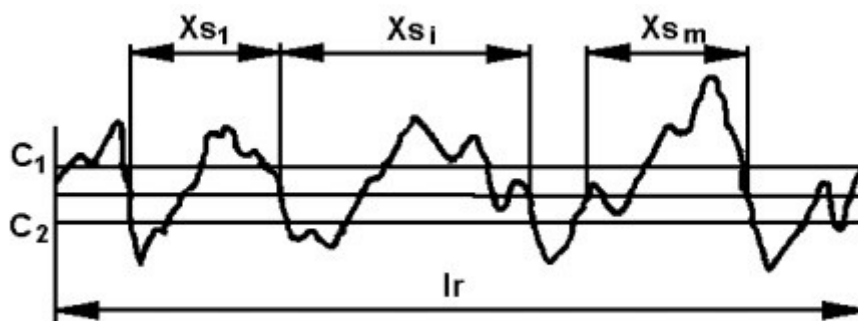
Obr. 5.5 – Parametr R_{sk}

Špičatost posuzovaného profilu R_{ku} – podíl průměrných hodnot čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky l_r . Při normálním rozdělení souřadnic profilu $R_{ku}=3$, ostřejší výstupky a rýhy $R_{ku}>3$ a naopak (obr. 5.6)

Obr. 5.6 – Parametr R_{ku}

6.2.2 Délkové parametry

Průměrná vzdálenost prvků profilu R_{Sm} – průměrná hodnota šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky (obr. 5.7). pro vyhodnocení je nutno zadat hladiny řezu C_1 a C_2 .



Obr. 5.7 – Parametr RSm

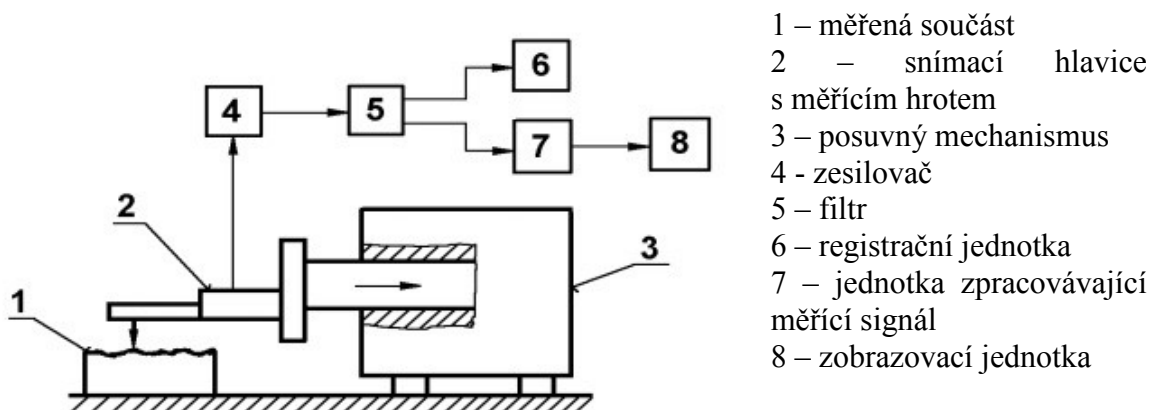
6.3 Kontrola parametrů drsnosti

Kritérium středního prvku (střední čára profilu – čára nejmenších čtverců) – toto kritérium se pro hodnocení drsnosti využívá nejčastěji.

6.3.1 Měření drsnosti povrchu dotykovým profilometrem

Metoda umožňuje zjišťování číselných hodnot jednotlivých parametrů drsnosti a lze ji využít pro nejmodernější statistická a spektrální hodnocení nerovnosti povrchu.

Dotykový profilometr se skládá z části mechanické a elektronické (schéma obr. 6.8).



Obr. 6.8 Princip měření dotykovým profilometrem

Mechanická část:

- stolek, na který se umísťuje měřená součást,
- rameno se snímacím hrotem, které se pohybuje určitou konstantní rychlostí a snímací hrot snímá nerovnosti povrchu,

- přímočarý vratný pohyb je zajištěn pomocí elektromotorku, popř. pneumaticky.

Elektronická část:

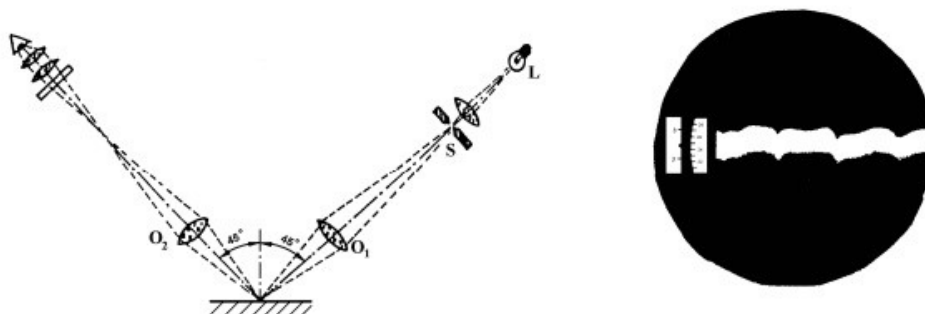
- transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál, který se zpracovává (číselná hodnota příslušného parametru drsnosti nebo grafický záznam nerovnosti povrchu).

Měřicí základnou je buď přesná přímá (nebo tvarová) dráha snímače – snímání absolutní, nebo dráha generovaná opěrnou patkou klouzající po měřeném povrchu – snímání relativní.

Pohyb snímacího hrotu musí být velmi přesný co do přímosti a rovnoměrnosti. Rychlost musí být volena s ohledem na dynamické vlastnosti snímacího systému. [21, 22, 23]

6.3.2 Měření drsnosti povrchu optickou metodou

Tyto měřicí metoda je bezdotyková, což vyloučí poškození měřeného povrchu. Dotykový hrot, který je u dotykové metody, je nahrazen světelným paprskem (obr. 6.9). ten se odráží nebo rozptyluje na měřeném povrchu. Interakce mezi světelným paprskem a povrchem závisí na vlnové délce světla, drsnosti povrchu a na vlastnostech měřeného vzorku. Hloubka vnikání světelného paprsku také ovlivňuje výsledek měření. Tato hloubka se mění podle součinitele absorpce materiálu. [21, 22]



Obr. 6.9 Metoda světelného řezu – princip a obraz v okuláru

Rovnoběžný svazek paprsků omezený štěrbinou do tvaru velmi tenké světelné roviny je promítán optickým systémem pod úhlem 45° na měřený povrch. Pronikem této roviny nerovnostmi povrchu vznikne obraz profilu šikmého řezu nerovnosti plochy, který má většinou tvar světlezelené stužky ve tmavém poli mikroskopického obrazu.

7 Experimentální část

Předmětem diplomové práce je experimentální srovnání kvality povrchů použitím kontaktní a bezkontaktní měřicí metody. V experimentální části se budu zabývat přípravami zkušebních vzorků, jejich měřením a hodnocením kvality řezných ploch pro dané technologie obrábění a porovnání vlivu některých parametrů. Pro tuto diplomovou práci byly použity tyto technologie:

- obrábění abrazivním vodním paprskem,
- obrábění laserovým paprskem,
- řezání pilou.

V dalším textu uvádím u jednotlivých technologií použité k řezání zkušebních vzorků nastavení řezných parametrů. Zároveň uvádím specifikaci měřicích přístrojů, které se využily při měření povrchových charakteristik řezných ploch.

7.1 Parametry použitého abrazivního vodního paprsku

Řezy materiálu byly provedeny ve dvou nastaveních, aby byl rozdíl patrný pouhým okem.

Nastavení prvního řezu – nejlepší kvalita:

- typ řezné hlavy: SLICE 1
- tlak vody: 400 MPa
- průměr vodní trysky: 0,33 mm
- průměr zaostřovací trubice: 0,91 mm
- délka zaostřovací hlavice: 76 mm
- použité abrazivo: indický granát

- zrnitost abraziva: 80 mesh
- průtok abraziva: 400 g.min^{-1}
- vzdálenost ústí zaostřovací trubice od materiálu: 2 mm
- rychlost řezání (Q5): 300 mm.s^{-1}

Nastavení druhého řezu – horší kvalita:

- typ řezné hlavy: SLICE 1
- tlak vody: 400 MPa
- průměr vodní trysky: 0,33 mm
- průměr zaostřovací trubice: 0,91 mm
- délka zaostřovací hlavice: 76 mm
- použité abrazivo: indický granát
- zrnitost abraziva: 80 mesh
- průtok abraziva: 400 g.min^{-1}
- vzdálenost ústí zaostřovací trubice od materiálu: 2 mm
- rychlost řezání (Q1 – Q2): 950 mm.s^{-1}

7.2 Parametry použitého laseru

Pro řezání vzorků pro diplomovou práci byl použit laser TRUMPF TruLaser L5030 – TruFlow 500.

Řezy materiálu byly provedeny ve dvou nastaveních, aby byl rozdíl patrný pouhým okem.

První nastavení – ideální = nejvhodnější nastavení podle zkušeností operátora:

- Rychlost řezání: 0,76 m/min
- Výkon: 5000 W
- Tlak plynu: 16 bar
- Ohnisková vzdálenost: -6 mm

Druhé nastavení – B = nejvhodnější nastavení podle manuálu:

- Rychlost řezání: 0,85 m/min
- Výkon: 5000W
- Tlak plynu: 16 bar
- Ohnisková vzdálenost: -4 mm

7.3 Parametry použité pily

Pro přípravu vzorků byla použita pásová pila bez koncové smyčky UNIMAX PPK 115.

Při řezání materiálů na pásových pilách dochází k nejmenším ztrátám materiálu prořezem a tím se dosahuje mnohem větší produktivity než u pil rámových. Tato metoda je vhodná pro dělení kvalitnějších a nákladnějších materiálů.



Obr. 7.1 Pásová pila PPK 115

Nastavení pásové pily:

- Řezná rychlost: 60 m/min
- Přisuv: 0,4 mm na cyklus
- Chlazení v řezu: etanol ve směsi s technickým ricinovým olejem.

7.4 Použitý dotykový profilometr [39, 40]

V této diplomové práci byl použit dotykový drsnoměr Surftest SJ-400.

Jedná se o přenosný měřicí přístroj, který umožňuje jednoduché a přesné měření drsnosti povrchu. [39, 40]

Drsnoměry Surftest nabízejí následující výhody:

- Systém měření bez kluzné patky s dotykovým ovládáním a vestavěnou tiskárnou.
- Možnost měření nezávislého na napájení ze sítě.
- Jednoduché a intuitivní navigační menu.
- Velký barevný LCD displej poskytující vysokou viditelnost.
- Snímač bez kluzné patky pro měření skutečného profilu (P), profilu drsnosti (R), profilu vlnitosti (W) a další.
- Povrchová kompenzace zakřivení, R-ploch a kompenzace sklonu.
- Provádění analýzy drsnosti odpovídající různým mezinárodním normám (EN ISO, VDA, ANSI, JIS) a vlastnímu uživatelskému nastavení.
- Až 10 různých podmínek měření může být uloženo do paměti drsnoměru. A až 500 na volitelnou paměťovou SD kartu.
- Až dvě různé vyhodnocovací podmínky v nastavení jednoho měření.
- Mnoho funkcí lze jednotlivě chránit heslem.
- Podpora až 16 jazyků.



Obr. 7.2 Dotykový drsnoměr Surftest Sj 400

Technická data:

Osa X (pohonná jednotka)

Rozsah měření: 25 nebo 50 mm.

Rychlost měření: 0,05; 0,1; 0,5; 1,0 mm/s.

Rychlost návratu: 0,5; 1,0; 2,0 mm/s

Detektor:

Metoda měření: bez kluzné patky / sklopené.

Měřicí síla: 4mN nebo 0,75mN

Poloměr sklonu křivosti: 40 mm

Stylus tip: diamant 90° / 5 µmR (60° / 2 µmR)

Rozměry (Š x V x H):

Řídící jednotka: 307 x 165 x 94 mm

Výškově nastavitelná jednotka: 131 x 63 x 99 mm

Pohonná jednotka: 128 x 36 x 47 mm

7.5 Použitý optický profilometr

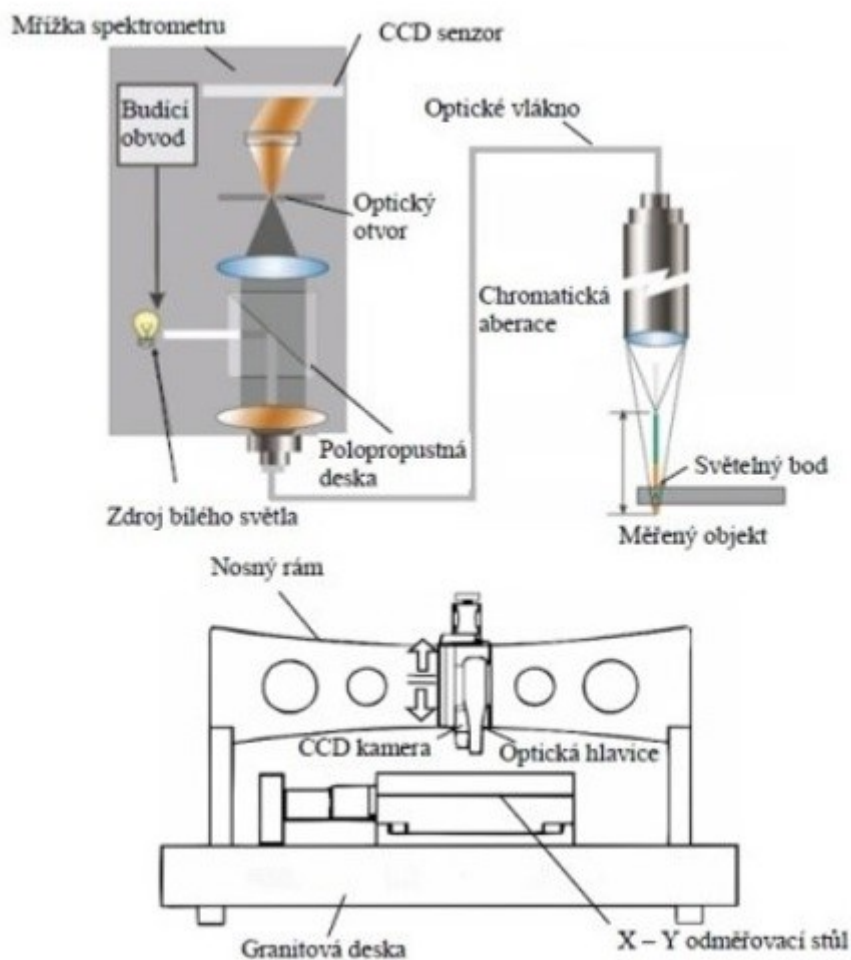
Pro naměření drsnosti povrchu jednotlivých vzorků byl použit optický profilometr MicroProf FRT (obr. 7.3)

FRT CWL chromatický senzor je rychlý optický senzor pro měření vzdálenosti. K tomuto účelu jsou k dispozici různé standardní i speciální senzorové hlavice s různými měřicími rozsahy. Princip nedestruktivního FRT CWL funguje na povrchy s vysokou i nízkou odrazivostí. Díky svému světelnému zdroji a intervalu měření až do frekvence 14 kHz se senzor používá pro celou řadu aplikací v řízení průmyslové výroby, výzkumu a vývoje. Až 16 různých měřících hlav lze kalibrovat na jedné snímací elektronice a může být použita v souladu s požadavky.

CWL je založen na principu měření chromatické vzdálenosti. Bílé světlo se soustředí na povrch měřicí hlavou s ohniskovou vzdáleností, která je závislá na vlnové délce. Spektrum světla odrážené na povrchu vytváří vrchol spektrometru. Vlnová délka tohoto vrcholu se používá k určení vzdálenosti k povrchu vzorku. [37, 41]

Funkce:

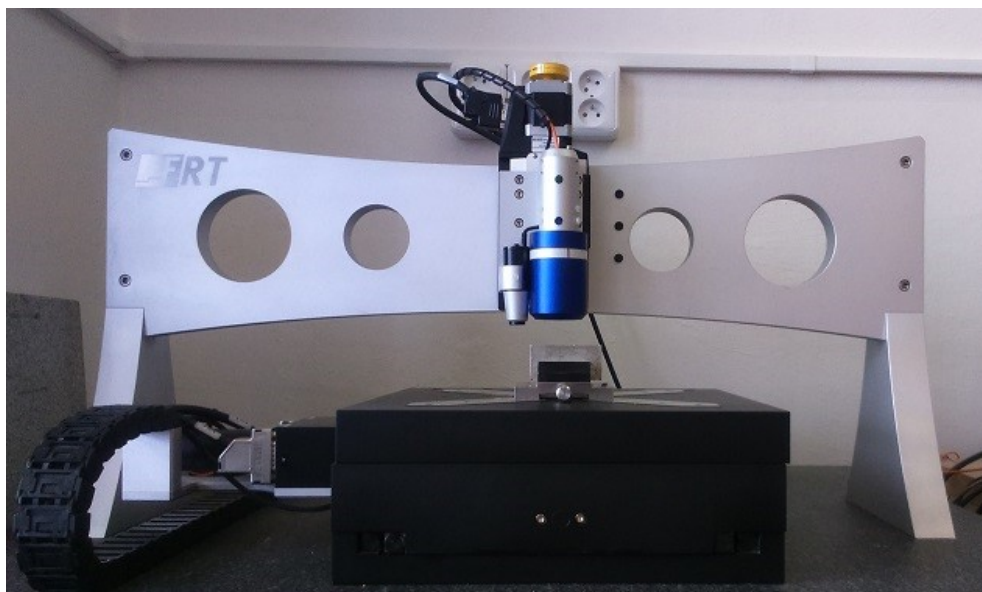
- optické bezdotykové a nedestruktivní měření,
- vysoká rychlost měření až 14 kHz,
- jasný a malý měřicí bod,
- vysoké postranní a vertikální rozlišení,
- vynikající poměr signál/šum,
- malá robustní měřicí hlava bez opotřebení.



Obr. 7.3 Schéma optického profilometru (37)

Typické měřicí úlohy:

- 2D profily,
- 3D topografie,
- drsnost a rovinnost,
- struktura a obrys.



Obr. 7.4 Chromatický senzor FRT CWL

Tab. 7.1 Pracovní parametry profilometru MicroProf FRT

Pracovní rozsah	
Osa x [mm]	200
Osa y [mm]	200
Osa z [mm]	50
Maximální měřicí rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	100
Minimální měřicí rychlost [$\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	1
Rozlišení nastavení os měřicího přístroje x, y, z [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	0,001
Přesnost nastavení polohy [mm]	$\pm 0,001$
Minimální vzdálenost mezi měřicími body $\Delta X, \Delta Y$ [μm]	0,6
Maximální rozměr měřeného vzorku [mm^3]	310 x 310 x 50
Maximální hmotnost vzorku [kg]	5
Hmotnost přístroje [kg]	520
Doporučená pracovní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	20 ± 2
Maximální dovolená změna teploty v laboratoři [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$]	0,5

7.6 Materiál AlMg₃ - ČSN 424413

Jako vhodný zkušební materiál, na kterém byly různými technologiemi vytvořeny řezné plochy, byla zvolena hliníková slitina AlMg₃ pro svou snadnou řezatelnost a dostupnost.

Chemické složení (hm. %):

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní	Al
Min				0,05	2,60				Fe+Si 0,60	zbytek
Max	0,50	0,40	0,10	0,40	4,00		0,20	0,20	Sb 0,25	

Charakteristické vlastnosti a použití

Tento materiál je přirozeně tvrdý, nevytvrditelný a odolný vůči mořské vodě. Materiál je chemicky stálý, je dobře eloxovatelný a leštitelný. Dá se dobře svařet i obrábět. Jeho pevnost v tahu je minimálně 180 MPa (tvrdost cca 45 HBW). [38]

Použití:

- strojírenství,
- stavba jednoúčelových strojů,
- stavba lodí,
- jednodušší svařované konstrukce,
- formy na pěnové a gumové materiály,
- stavba automobilů,
- prototypy automobilů.

8 Výsledky experimentů

V průběhu experimentů byly různými technologiemi (abrazivní vodní paprsek, laserový paprsek a pásová pila) řezány zkušební vzorky tloušťky 10 mm při různých podmínkách. Řezné plochy byly následně analyzovány a změřeny jejich povrchové charakteristiky Ra a Rz kontaktní a bezkontaktní metodou. Byly proměřeny profily každé řezné plochy 1 mm od hrany vstupu paprsku (abrazivního vodního paprsku a laserového paprsku) do materiálu, uprostřed řezné plochy a 1 mm před výstupem paprsku z materiálu. Podobně byly změřeny profily u vzorků řezaných pilou. (1 mm od obou hran a uprostřed řezné plochy). Aby byl zachován shodný směr, byly vzorky při řezání pilou postaveny „na výšku“.

Na následujících stránkách jsou uvedeny výsledky experimentů ve formě obrázků a grafů pro každý vzorek (řeznou plochu). Jako první je vždy uvedena fotografie řezné plochy, následují grafy vývoje drsností se vzrůstající vzdáleností od horní hrany (hrana vstupu paprsku do řezu). Dále je uvedena ukázka profilu části řezné plochy, získané pomocí optické metody. Vždy jsou také uvedeny parametry řezu.

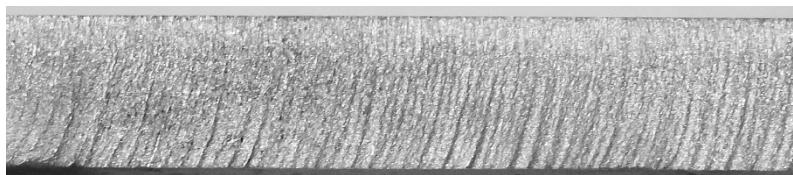
V další části jsem porovnávala drsnosti řezných ploch jednotlivých metod obrábění.

Všechny vzorky byly měřeny ve třech liniích. Tyto linie byly nastaveny na vzdálenost 1 mm, 5 mm a 9 mm od hrany vstupu paprsku.

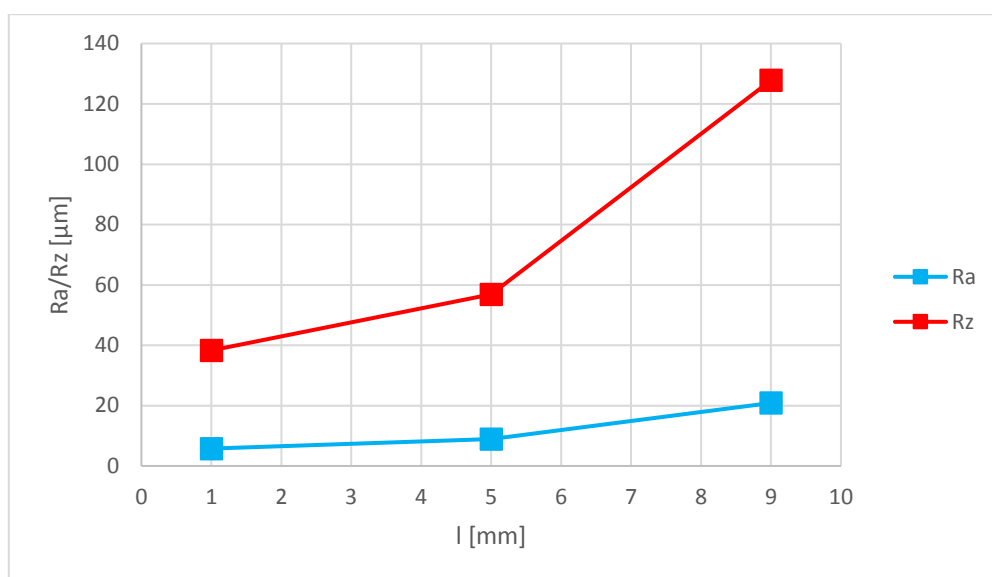
8.1 Abrazivní vodní paprsek

Zkušební vzorek č. 1

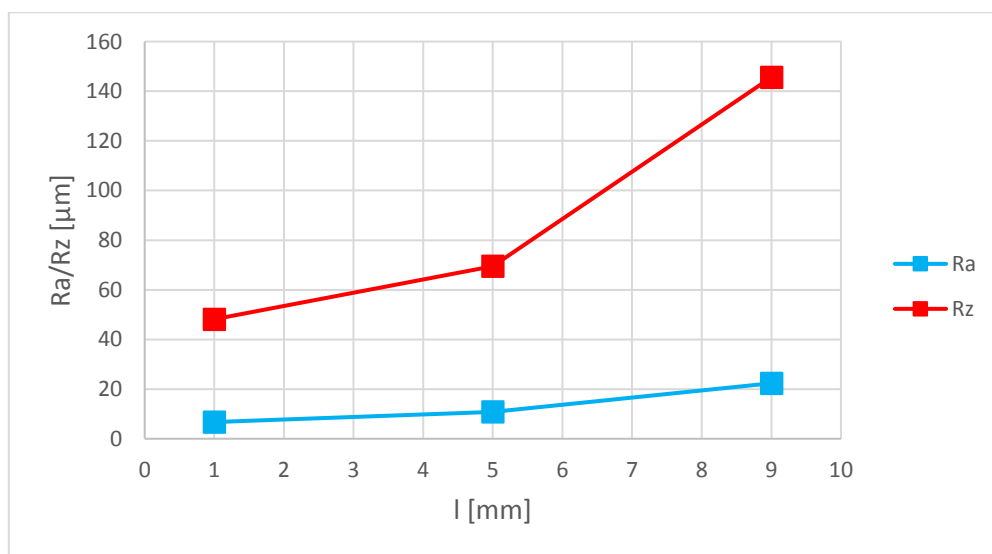
(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 400 g.min⁻¹, rychlost řezání 950 mm.s⁻¹)



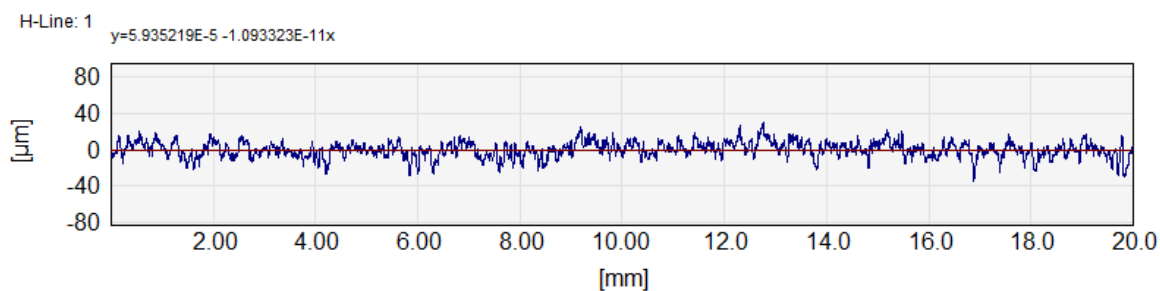
Obr. 8.1 Zkušební vzorek č.1



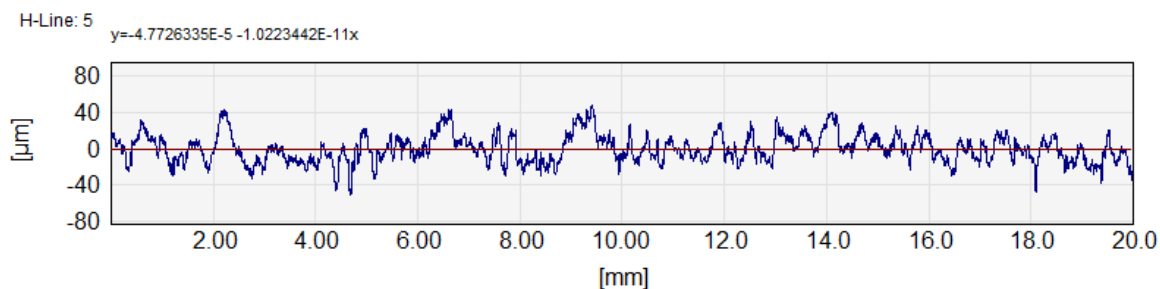
Graf 8.1.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu kontaktní metodou



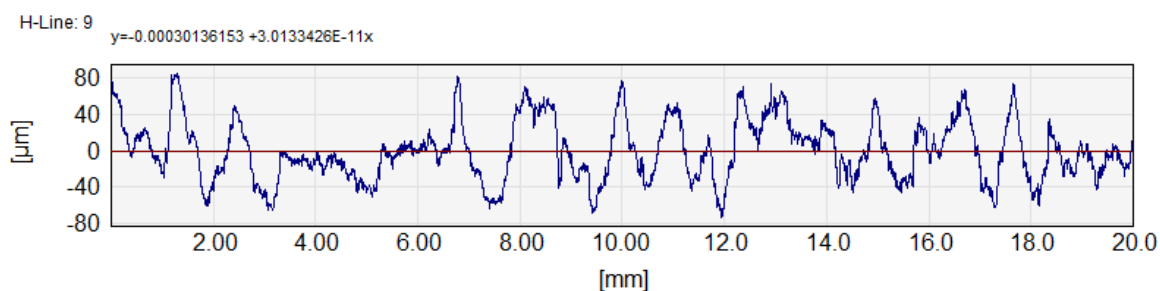
Graf 8.1.2 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu bezkontaktní metodou.



Obr. 8.2 Profil řezné plochy – 1 mm od hrany vstupu paprsku



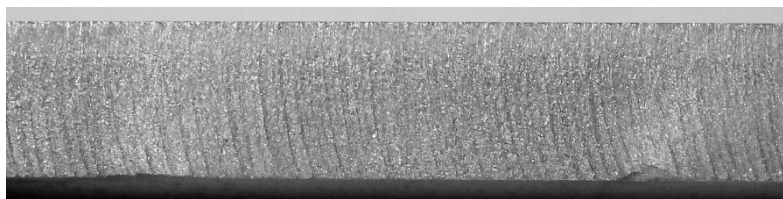
Obr. 8.3 Profil řezné plochy – 5 mm od hrany vstupu paprsku



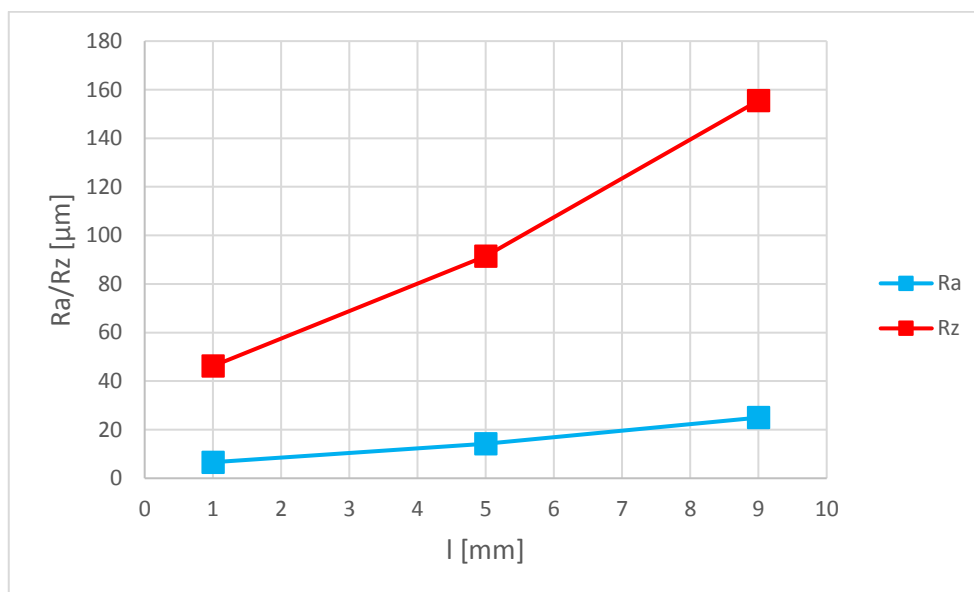
Obr. 8.4 Profil řezné plochy – 9 mm od hrany vstupu paprsku

Zkušební vzorek č. 2

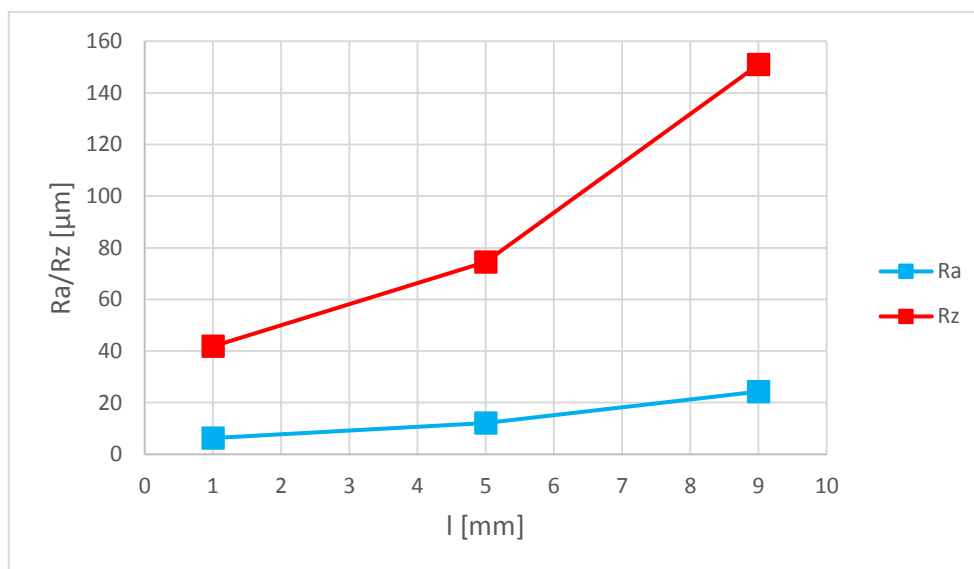
(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 400 g.min⁻¹, rychlost řezání 950 mm.s⁻¹)



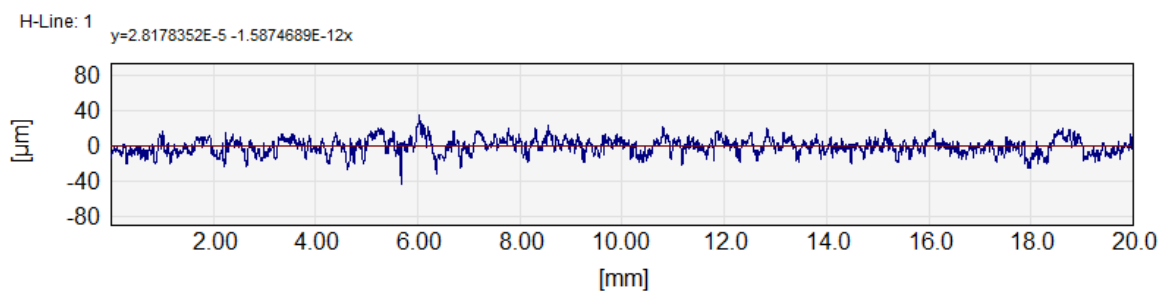
Obr. 8.5 Zkušební vzorek č.2



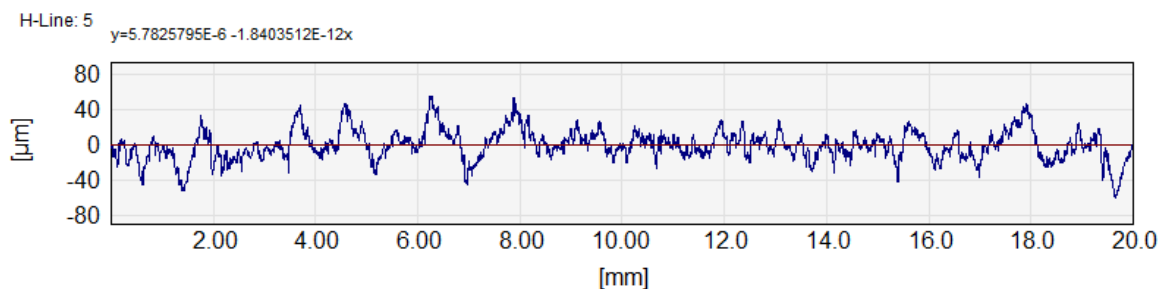
Graf 8.1.3 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu kontaktní metodou kontakt



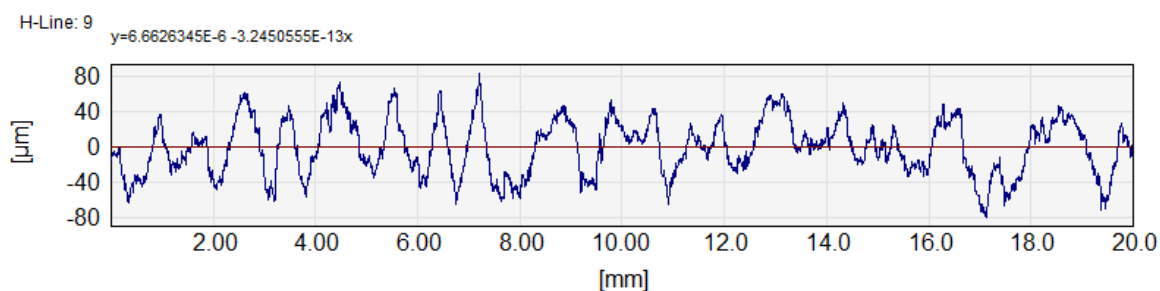
Graf 8.1.4 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu bezkontaktní metodou.



Obr. 8.6 Profil řezné plochy – 1 mm od hrany vstupu paprsku



Obr. 8.7 Profil řezné plochy – 5 mm od hrany vstupu paprsku



Obr. 8.8 Profil řezné plochy – 9 mm od hrany vstupu paprsku

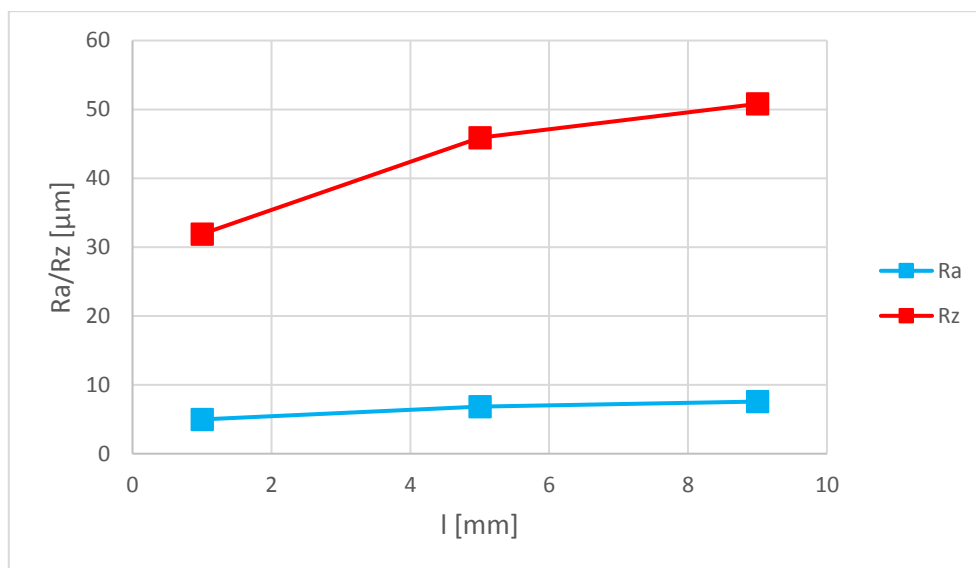
8.2 Abrazivní vodní paprsek

Zkušební vzorek č. 3

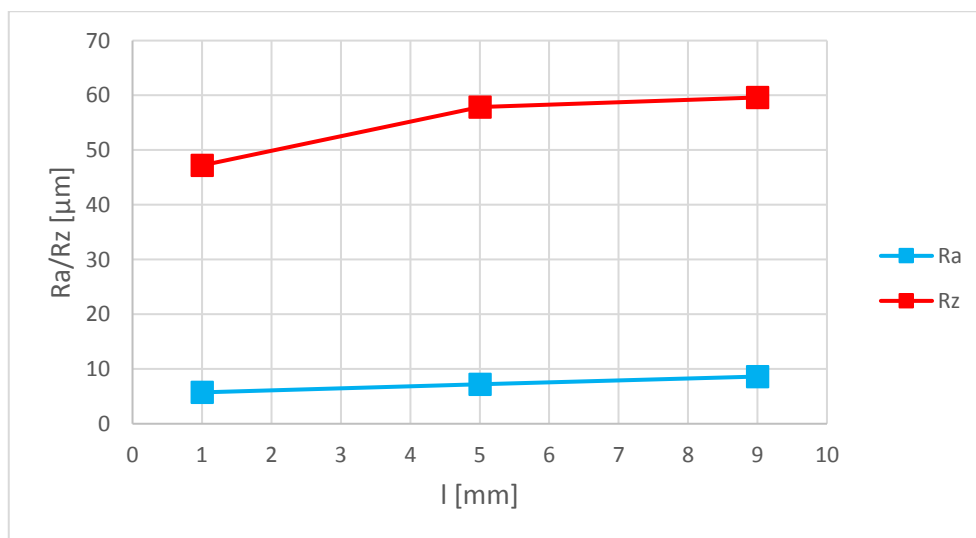
(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 400 g.min⁻¹, rychlost řezání 300 mm.s⁻¹)



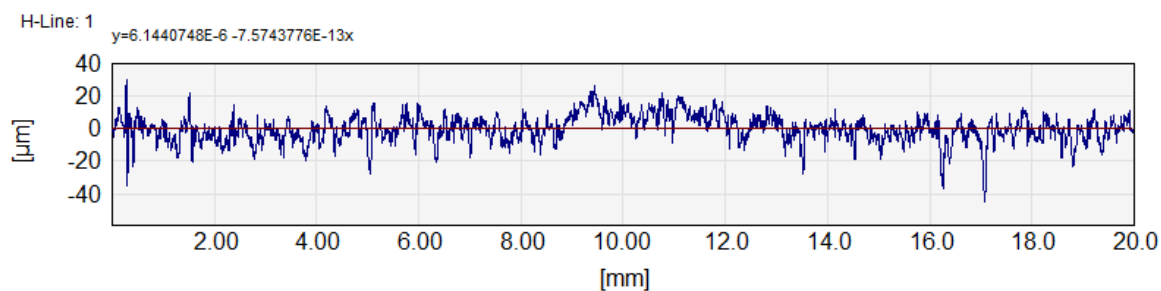
Obr. 8.9 Zkušební vzorek č.3



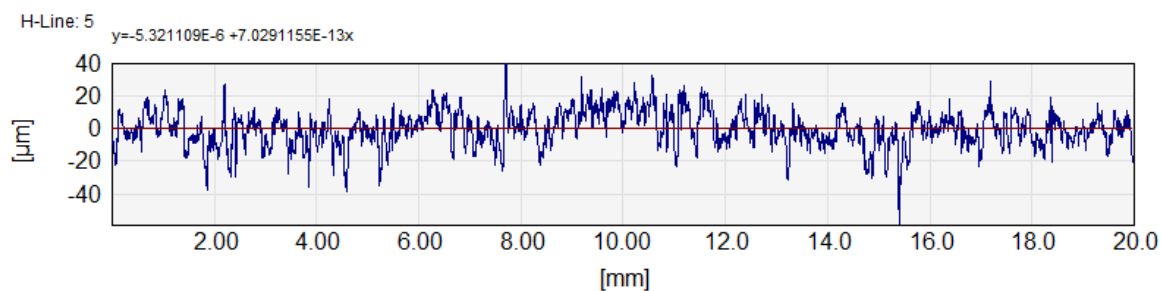
Graf 8.2.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu kontaktní metodou.



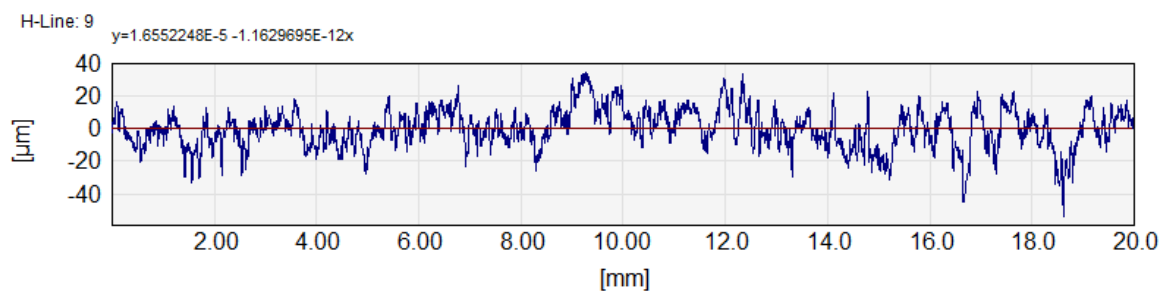
Graf 8.2.2 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu bezkontaktní metodou.



Obr. 8.10 Profil řezné plochy – 1 mm od hrany vstupu paprsku



Obr. 8.11 Profil řezné plochy – 5 mm od hrany vstupu paprsku



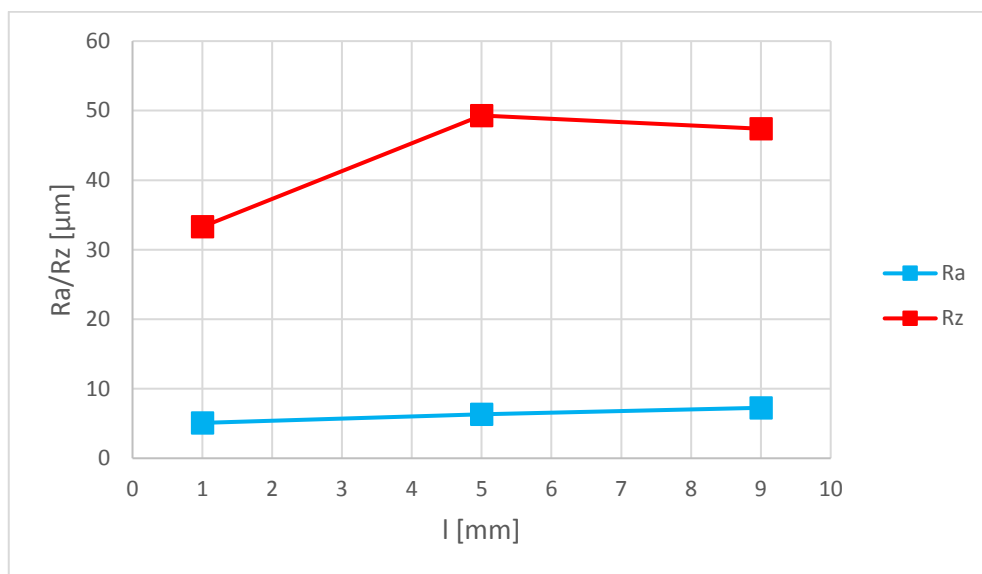
Obr. 8.12 Profil řezné plochy – 9 mm od hrany vstupu paprsku

Zkušební vzorek č. 4

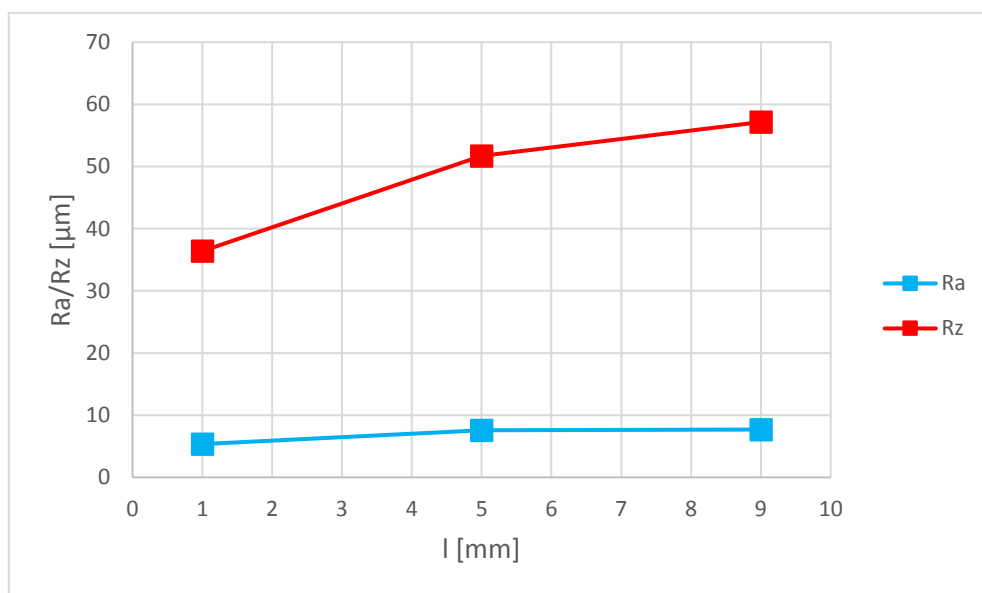
(tlak vody 400 MPa, hmotnostní průtok abraziva 400 g.min⁻¹, rychlost řezání 300 mm.s⁻¹)



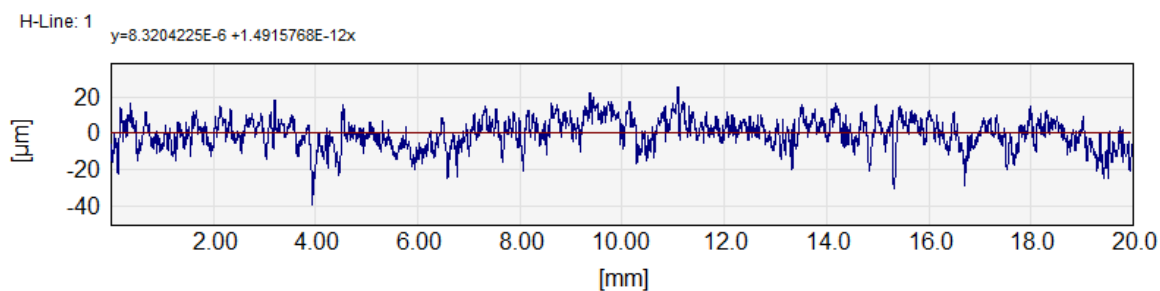
Obr. 8.13 Zkušební vzorek č. 4



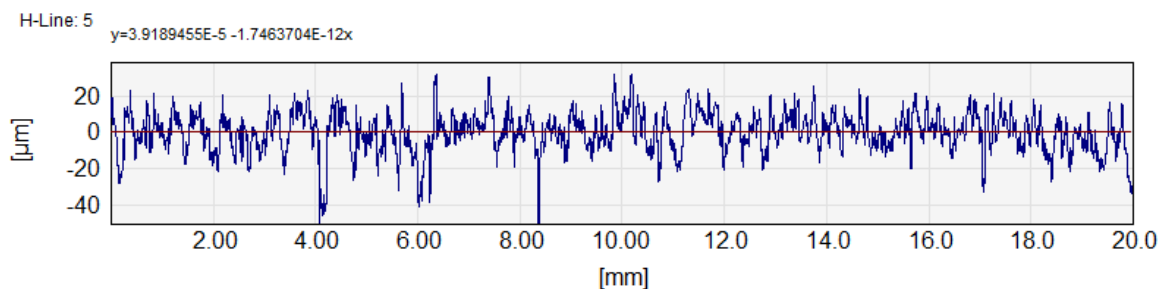
Graf 8.2.3 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu kontaktní metodou.



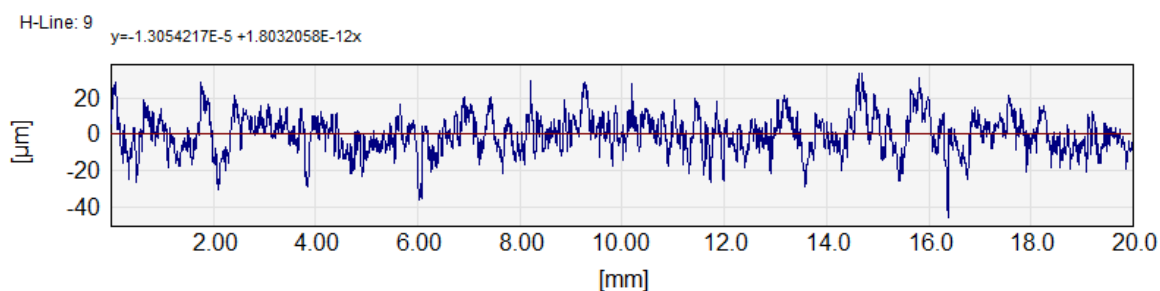
Graf 8.2.4 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu bezkontaktní metodou.



Obr. 8.14 Profil řezné plochy – 1 mm od hrany vstupu paprsku



Obr. 8.15 Profil řezné plochy – 5 mm od hrany vstupu paprsku

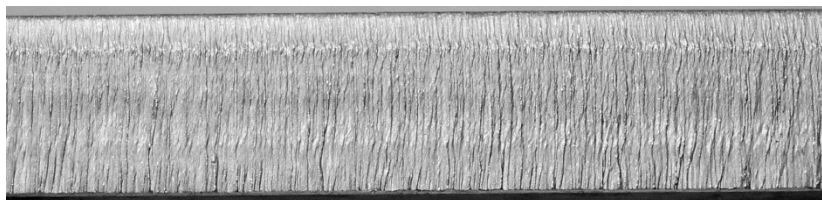


Obr. 8.16 Profil řezné plochy – 9 mm od hrany vstupu paprsku

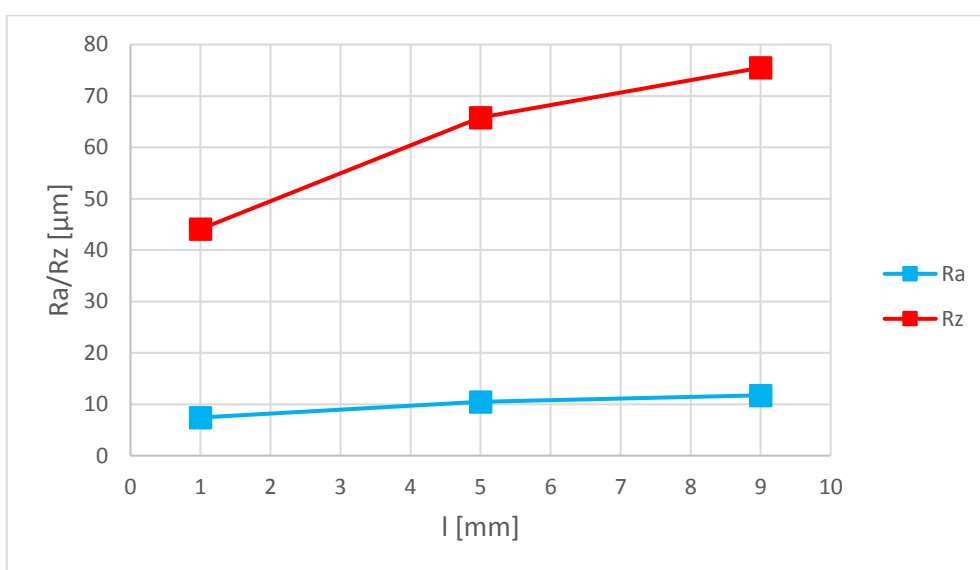
8.3 Laserový paprsek

Zkušební vzorek č. 5

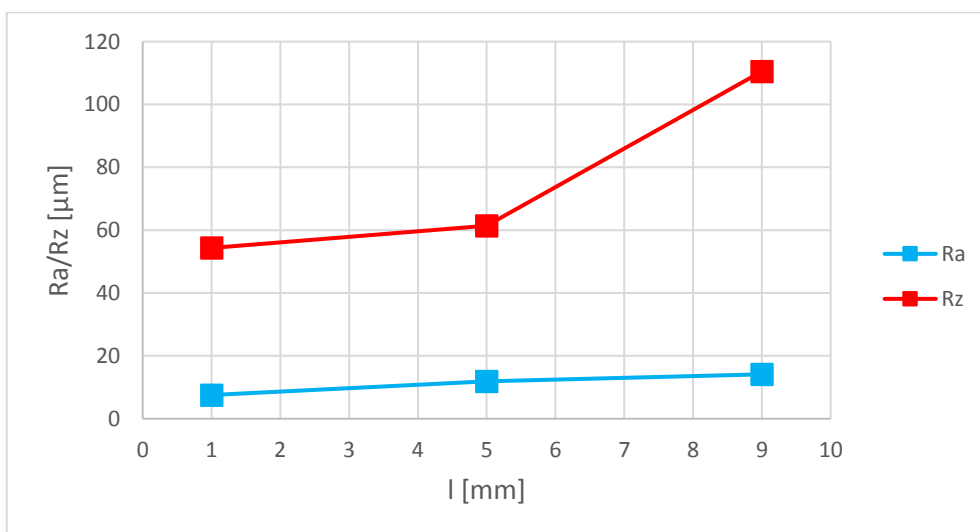
(rychlost řezání 0,76 m/min, výkon 5000 W, tlak plynu 16 bar, ohnisková vzdálenost -6 mm)



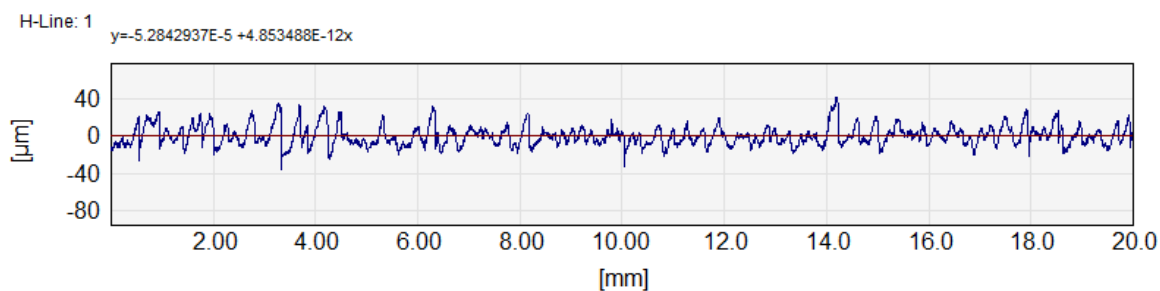
Obr. 8.17 Zkušební vzorek č. 5



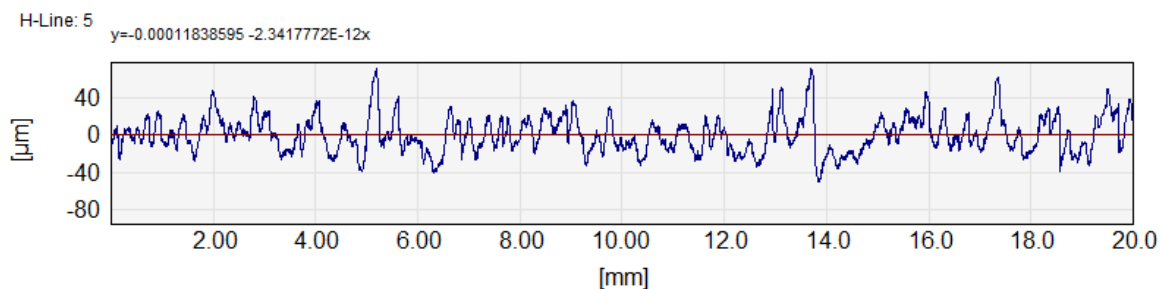
Graf 8.3.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu kontaktní metodou.



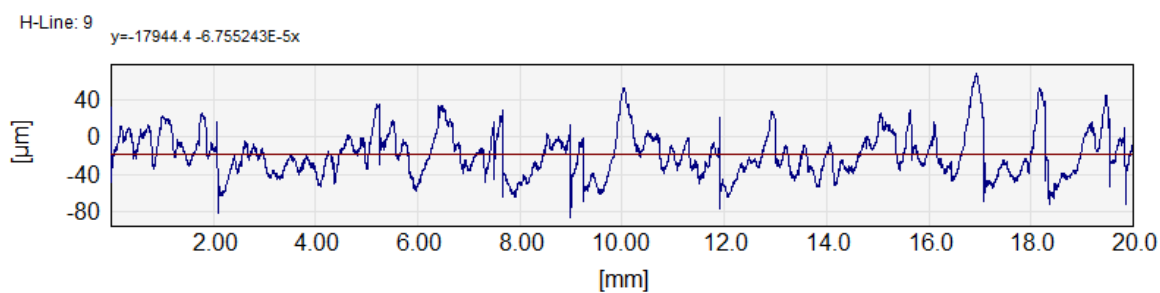
Graf 8.3.2 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu bezkontaktní metodou.



Obr. 8.18 Profil řezné plochy – 1 mm od hrany vstupu paprsku



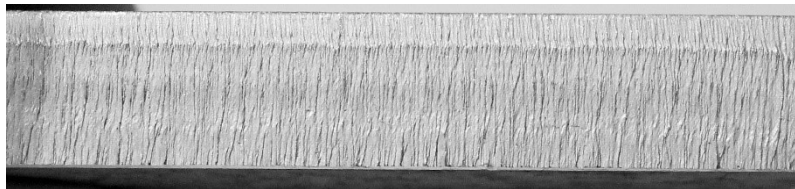
Obr. 8.19 Profil řezné plochy – 5 mm od hrany vstupu paprsku



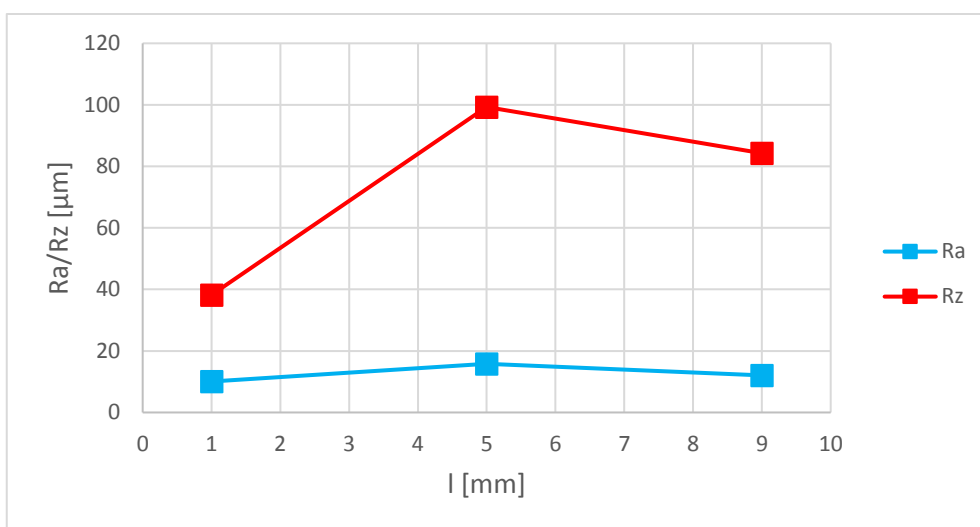
Obr. 8.20 Profil řezné plochy – 9 mm od hrany vstupu paprsku

Zkušební vzorek č. 6

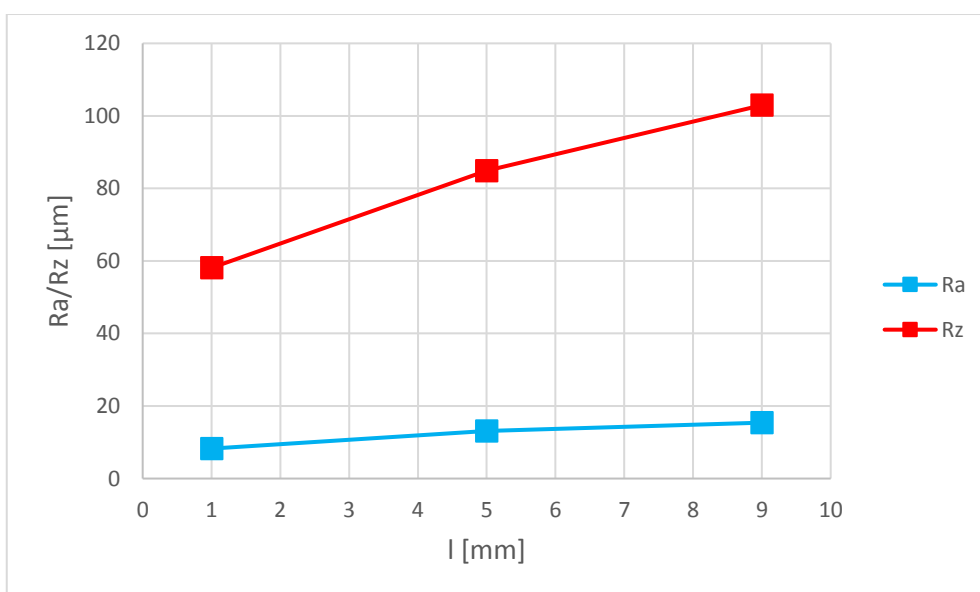
(rychlost řezání 0,76 m/min, výkon 5000 W, tlak plynu 16 bar, ohnisková vzdálenost -6 mm)



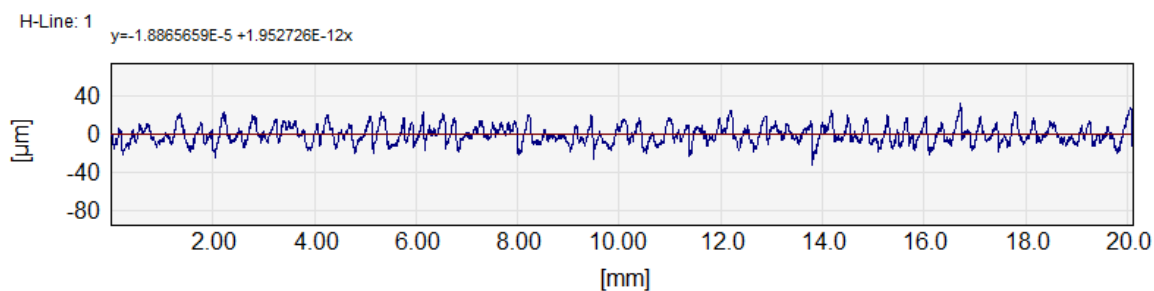
Obr. 8.21 Zkušební vzorek č. 6



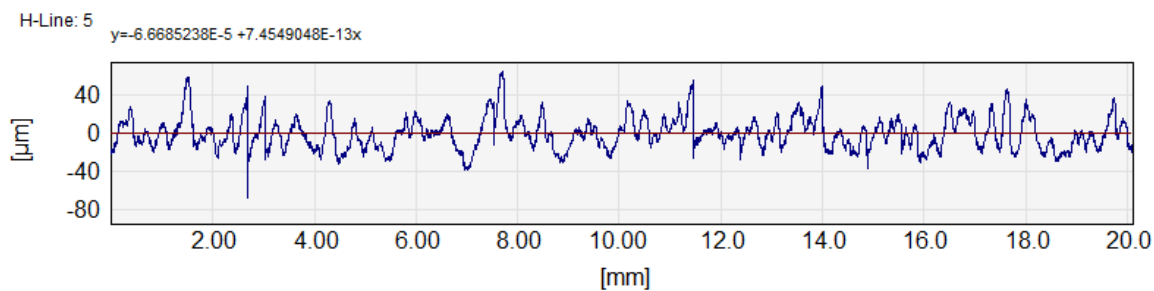
Graf 8.3.3 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu kontaktní metodou.



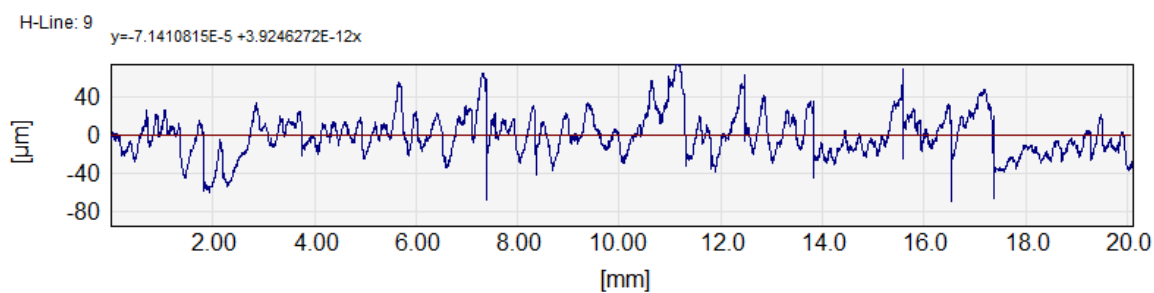
Graf 8.3.4 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu bezkontaktní metodou.



Obr. 8.22 Profil řezné plochy – 1 mm od hrany vstupu paprsku



Obr. 8.23 Profil řezné plochy – 5 mm od hrany vstupu paprsku

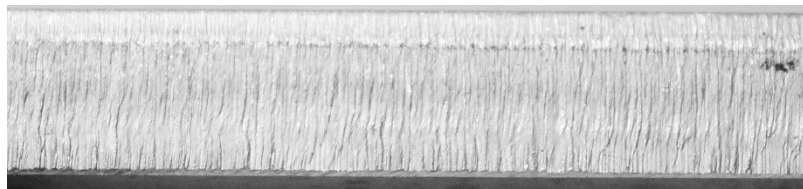


Obr. 8.24 Profil řezné plochy – 9 mm od hrany vstupu paprsku

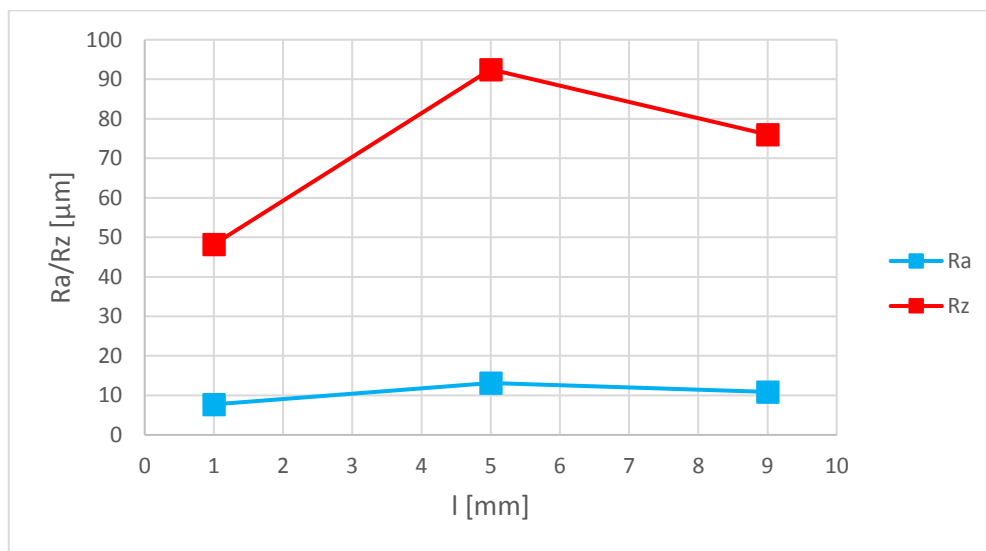
8.4 Laserový paprsek

Zkušební vzorek č. 7

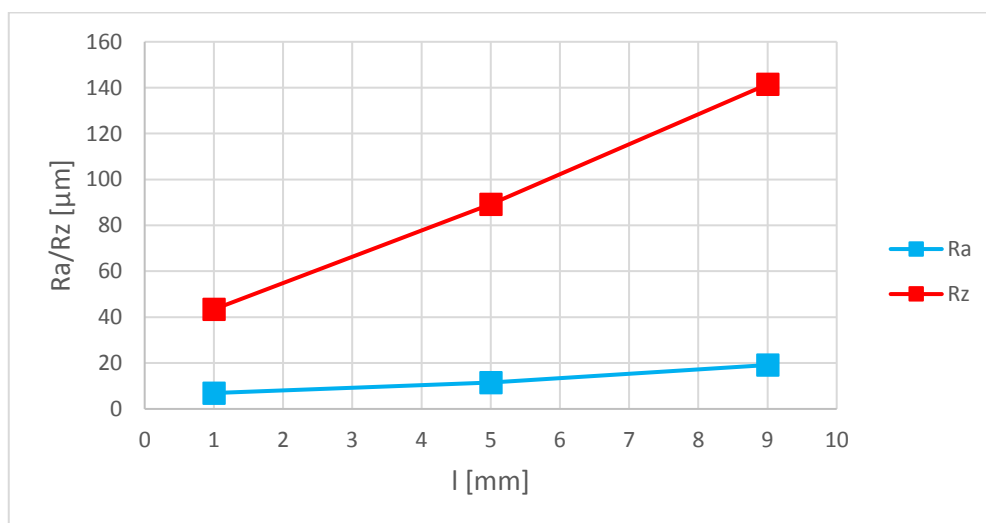
(rychlost řezání 0,85 m/min, výkon 5000 W, tlak plynu 16 bar, ohnisková vzdálenost -4 mm)



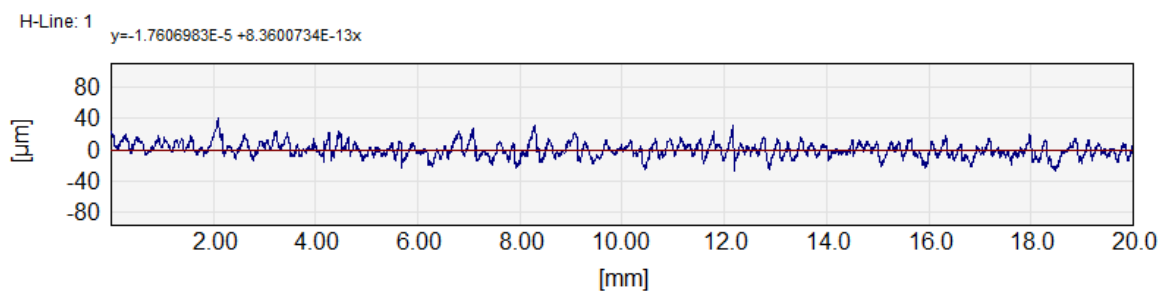
Obr. 8.25 Zkušební vzorek č. 7



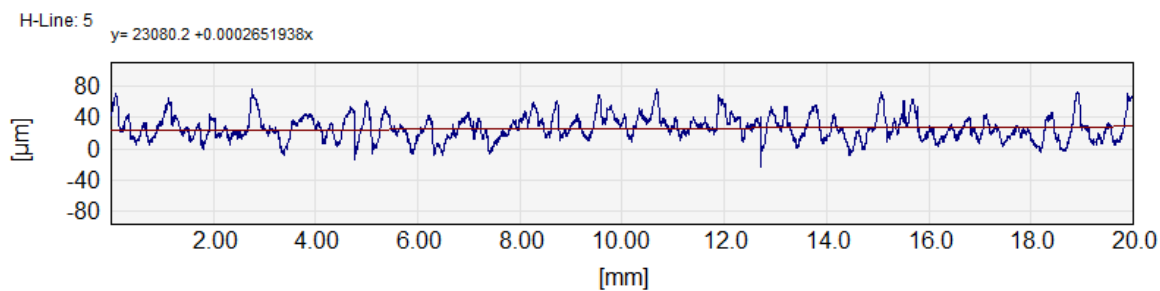
Graf 8.4.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu kontaktní metodou.



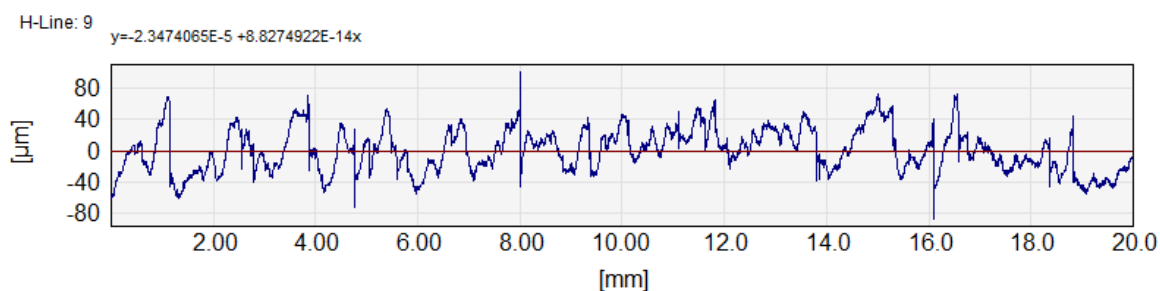
graf 8.4.2 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu bezkontaktní metodou.



Obr. 8.26 Profil řezné plochy – 1 mm od hrany vstupu paprsku



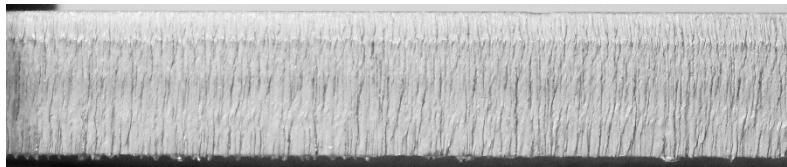
Obr. 8.27 Profil řezné plochy – 5 mm od hrany vstupu paprsku



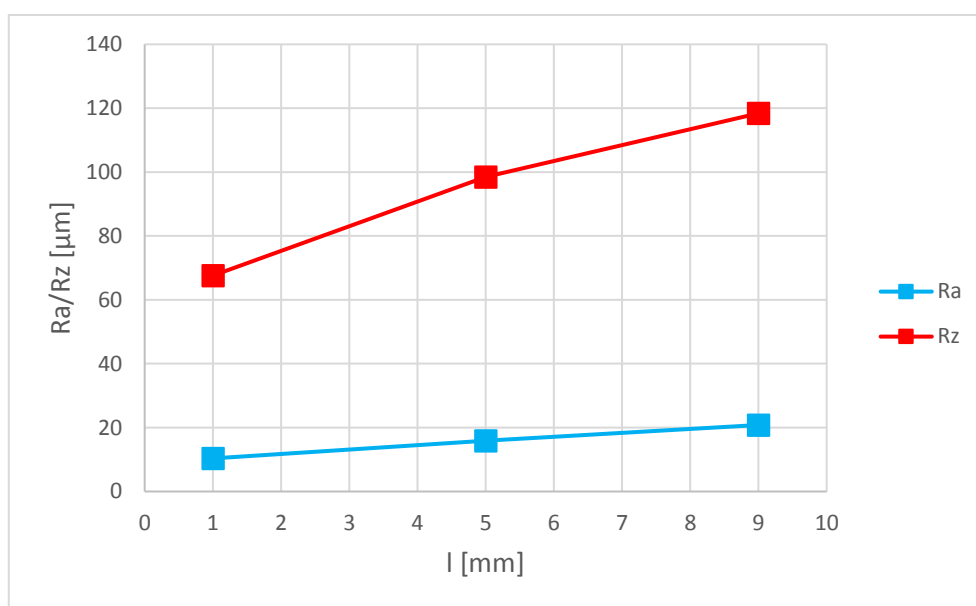
Obr. 8.28 Profil řezné plochy – 9 mm od hrany vstupu paprsku

Zkušební vzorek č. 8

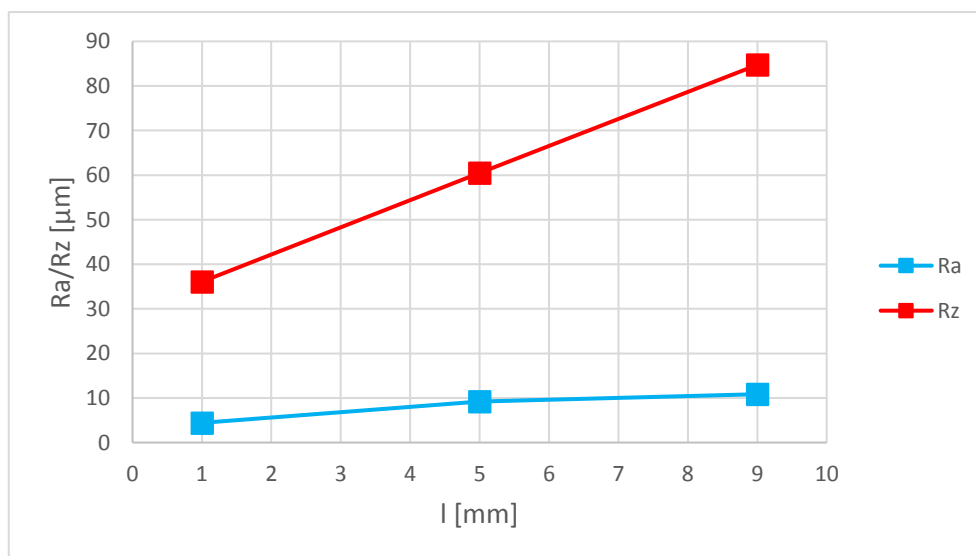
(rychlost řezání 0,85 m/min, výkon 5000 W, tlak plynu 16 bar, ohnisková vzdálenost -4 mm)



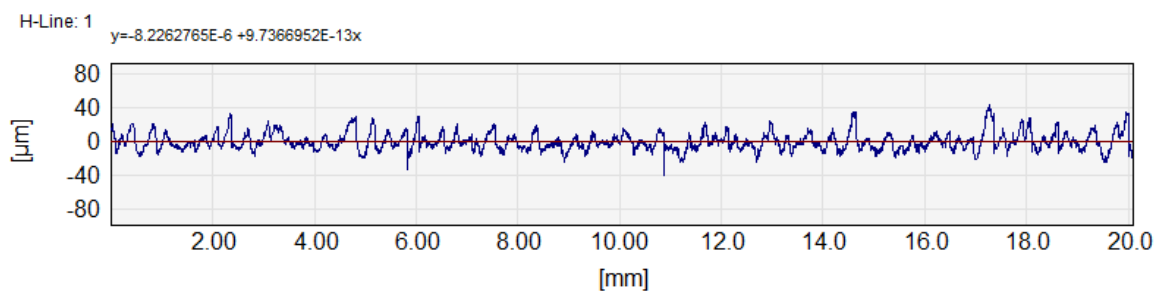
Obr. 8.29 Zkušební vzorek č. 8



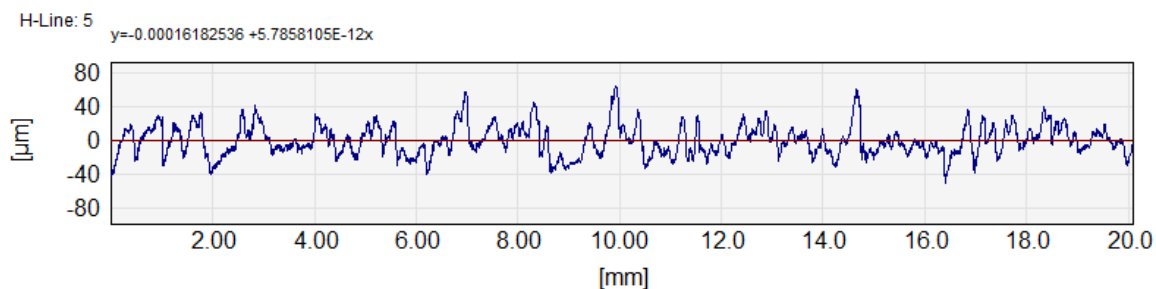
Graf 8.4.3 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu kontaktní metodou.



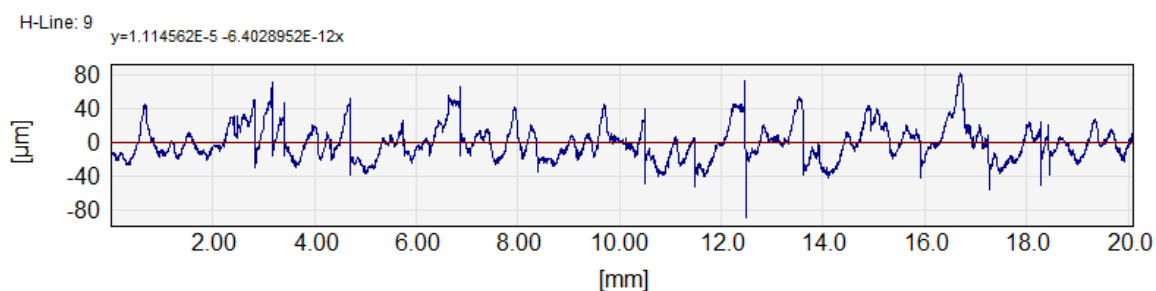
Graf 8.4.4 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu bezkontaktní metodou.



Obr. 8.30 Profil řezné plochy – 1 mm od hrany vstupu paprsku



Obr. 8.31 Profil řezné plochy – 5 mm od hrany vstupu paprsku

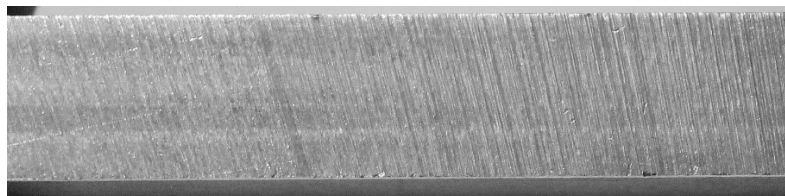


Obr. 8.32 Profil řezné plochy – 9 mm od hrany vstupu paprsku

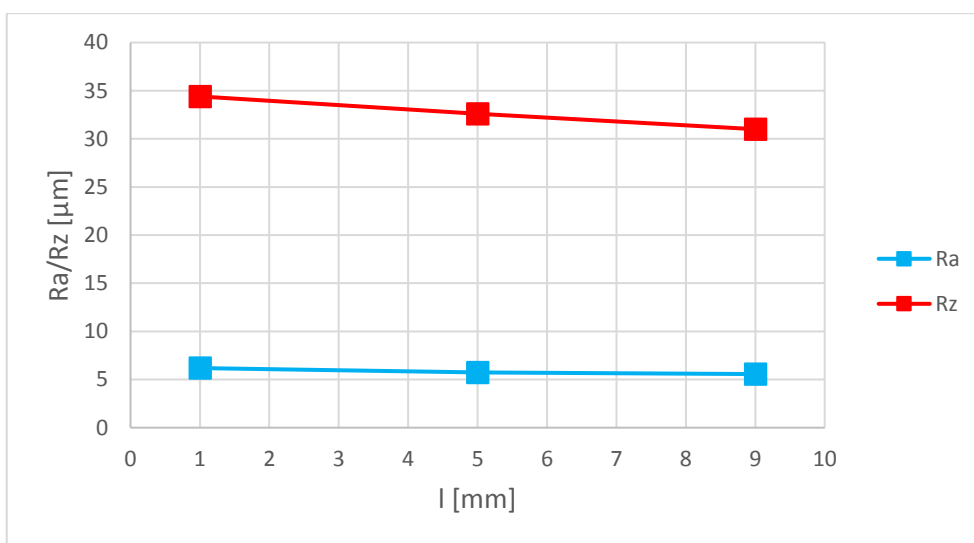
8.5 Pila

Zkušební vzorek č. 9

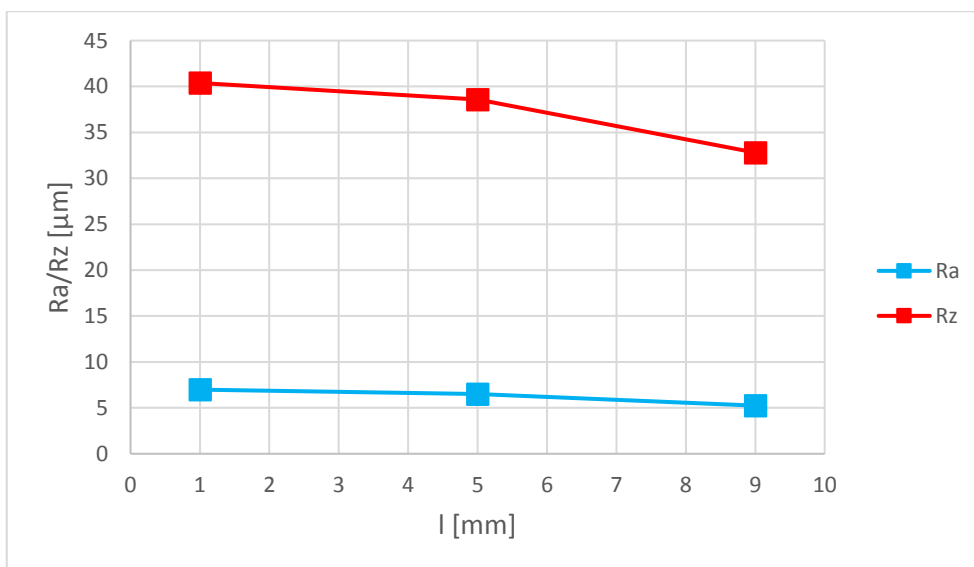
(řezná rychlost 60 m/min, přísuv 0,4 mm na cyklus)



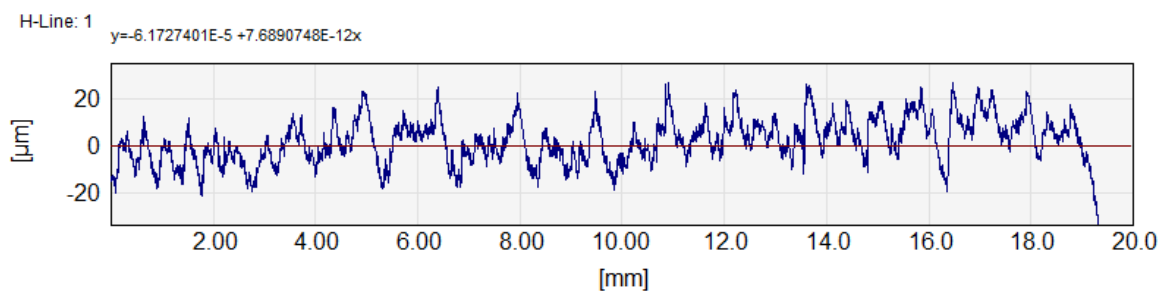
Obr. 8.33 Zkušební vzorek č. 9



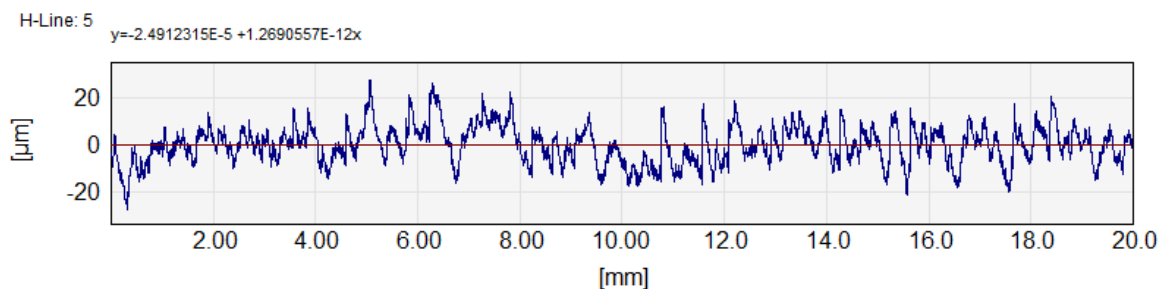
Graf 8.5.1 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu kontaktní metodou.



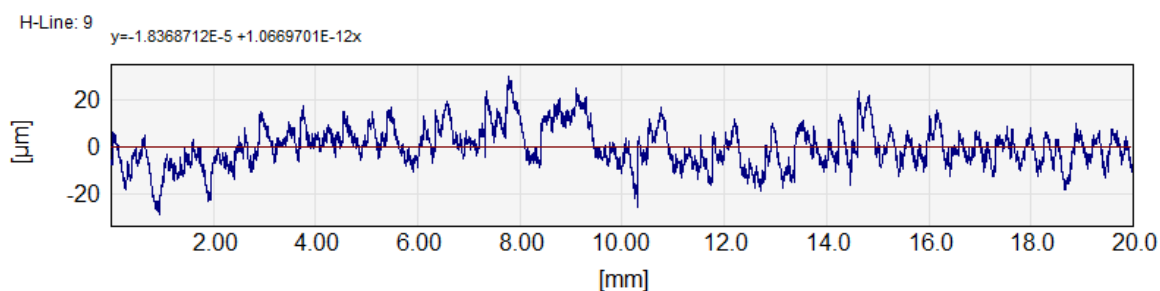
Graf 8.5.2 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu bezkontaktní metodou.



Obr. 8.34 Profil řezné plochy – 1 mm od hrany vstupu paprsku



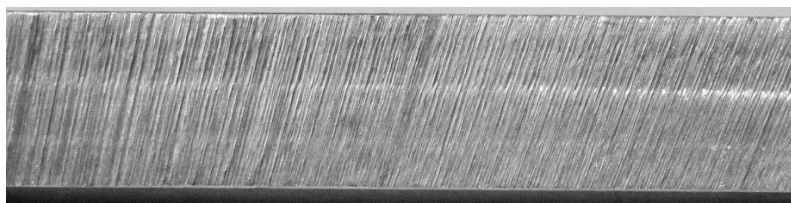
Obr. 8.35 Profil řezné plochy – 5 mm od hrany vstupu paprsku



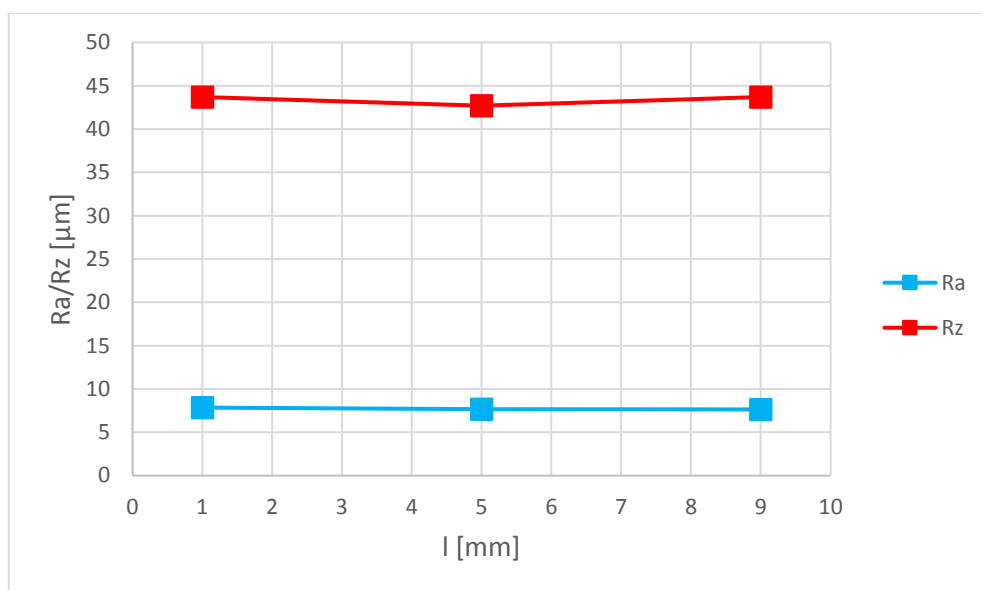
Obr. 8.36 Profil řezné plochy – 9 mm od hrany vstupu paprsku

Zkušební vzorek č. 10

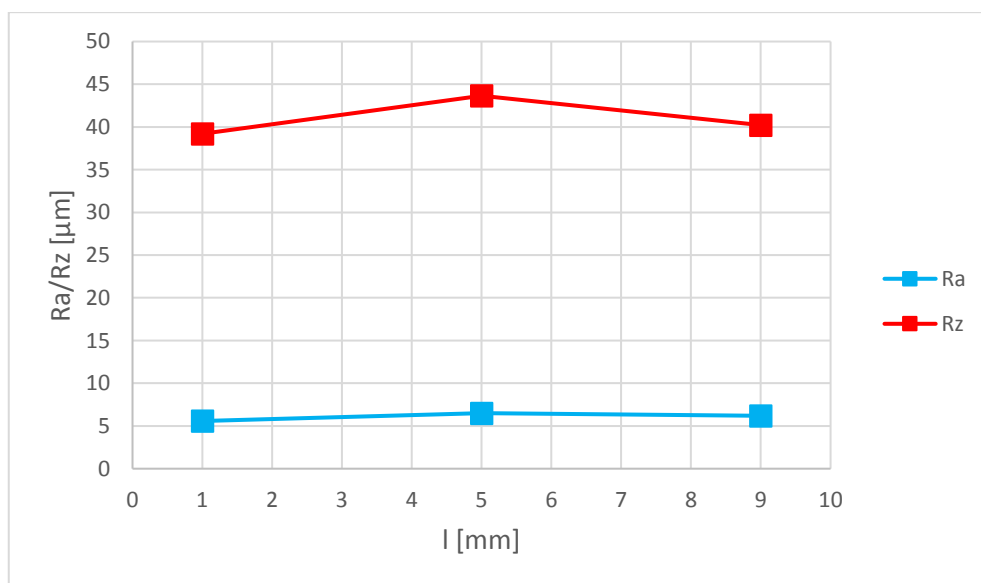
(řezná rychlost 60 m/min, přísuv 0,4 mm na cyklus)



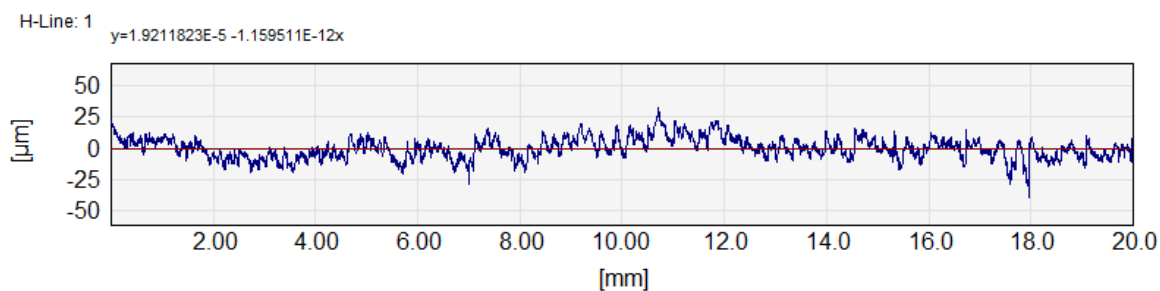
Obr. 8.37 Zkušební vzorek č. 10



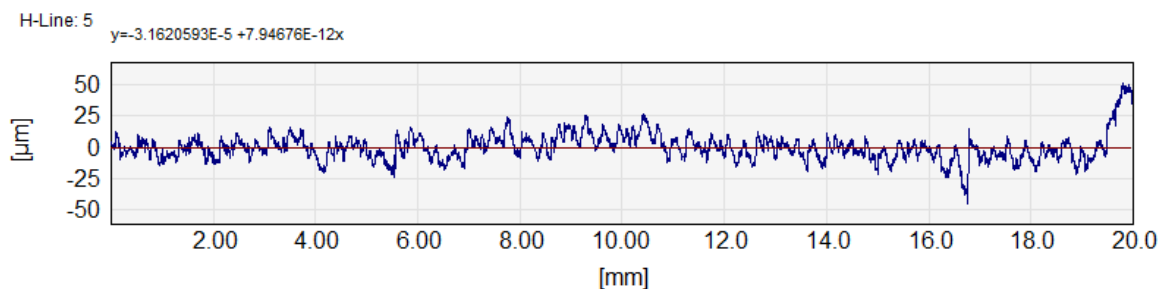
Graf 8.5.3 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu kontaktní metodou.



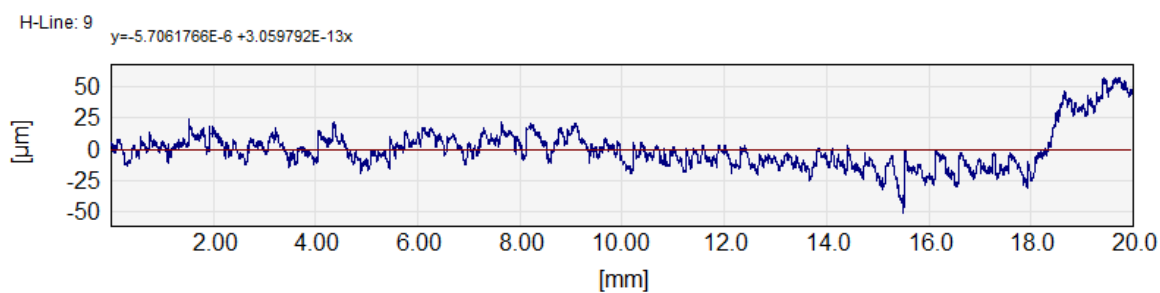
Graf 8.5.4 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu bezkontaktní metodou.



Obr. 8.38 Profil řezné plochy – 1 mm od hrany vstupu paprsku



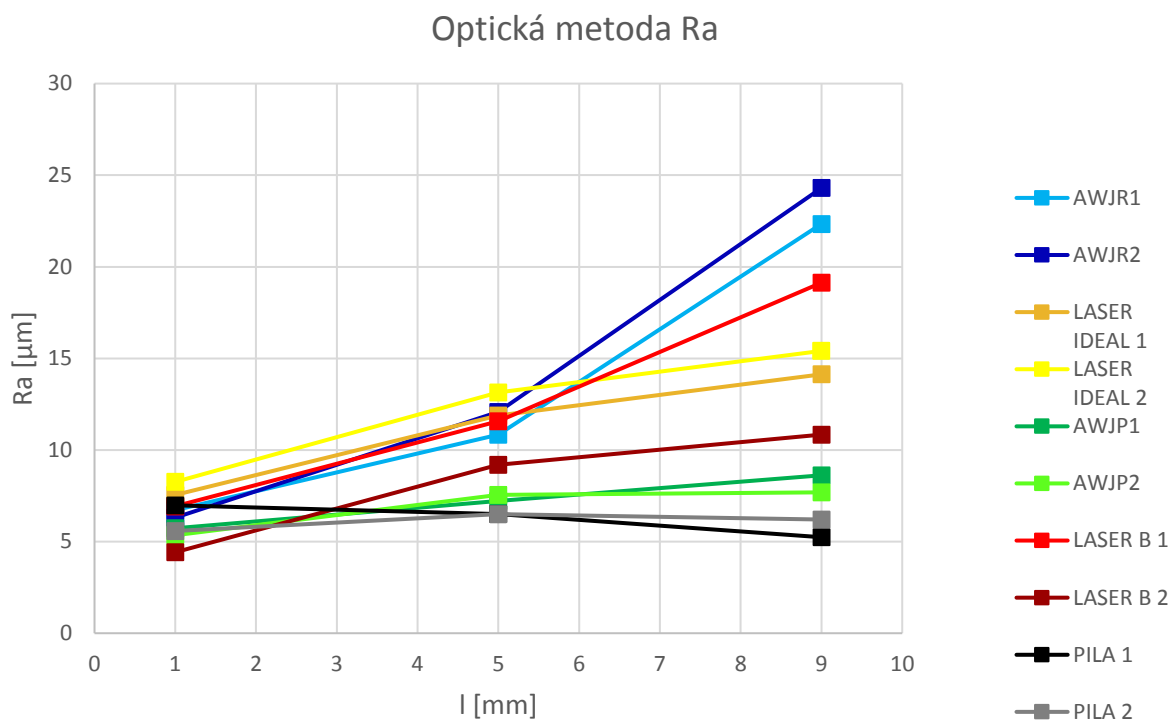
Obr. 8.39 Profil řezné plochy – 5 mm od hrany vstupu paprsku



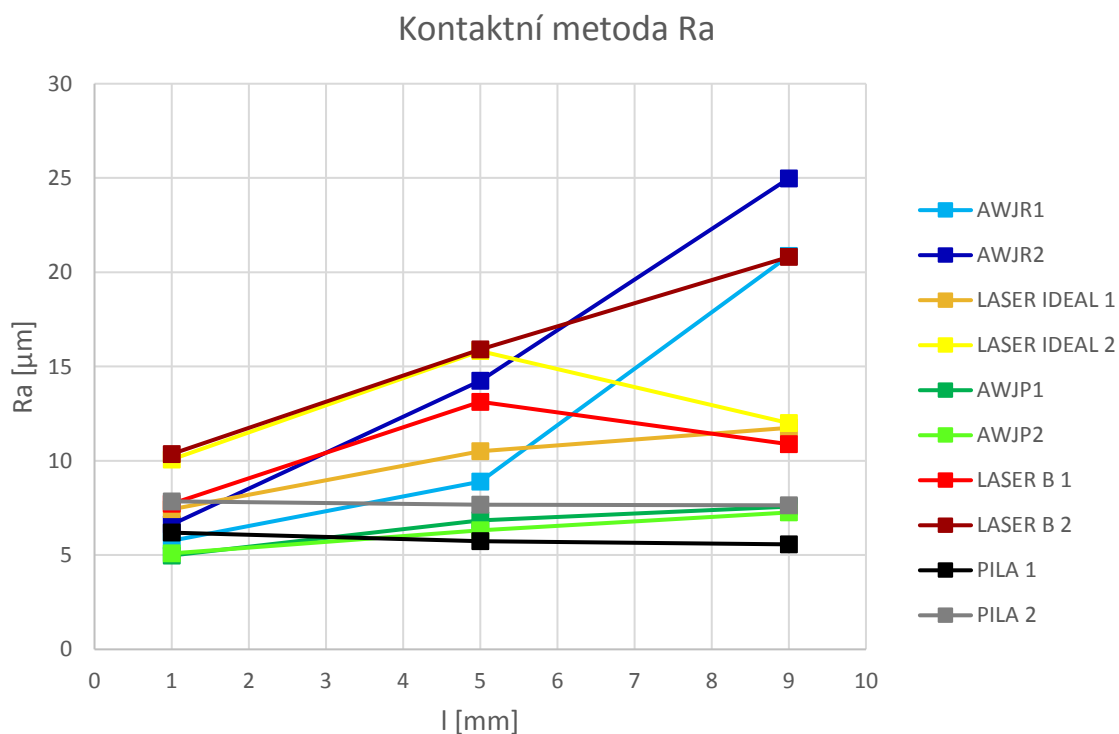
Obr. 8.40 Profil řezné plochy – 9 mm od hrany vstupu paprsku

8.6 Srovnání vzorků

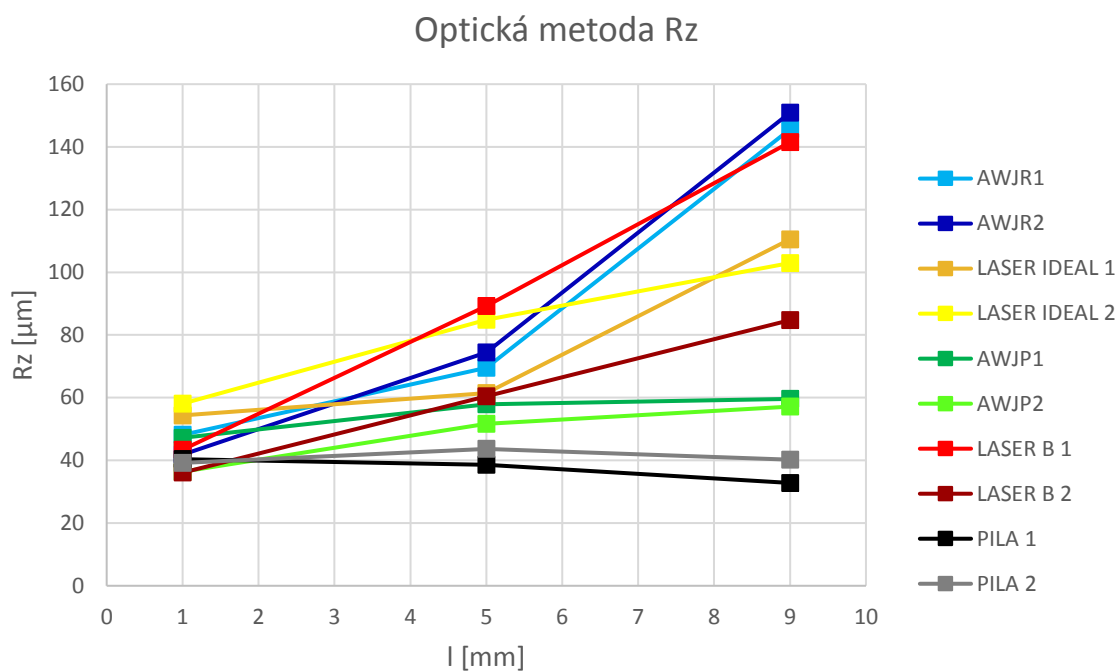
a) Střední aritmetická úchylka profilu Ra



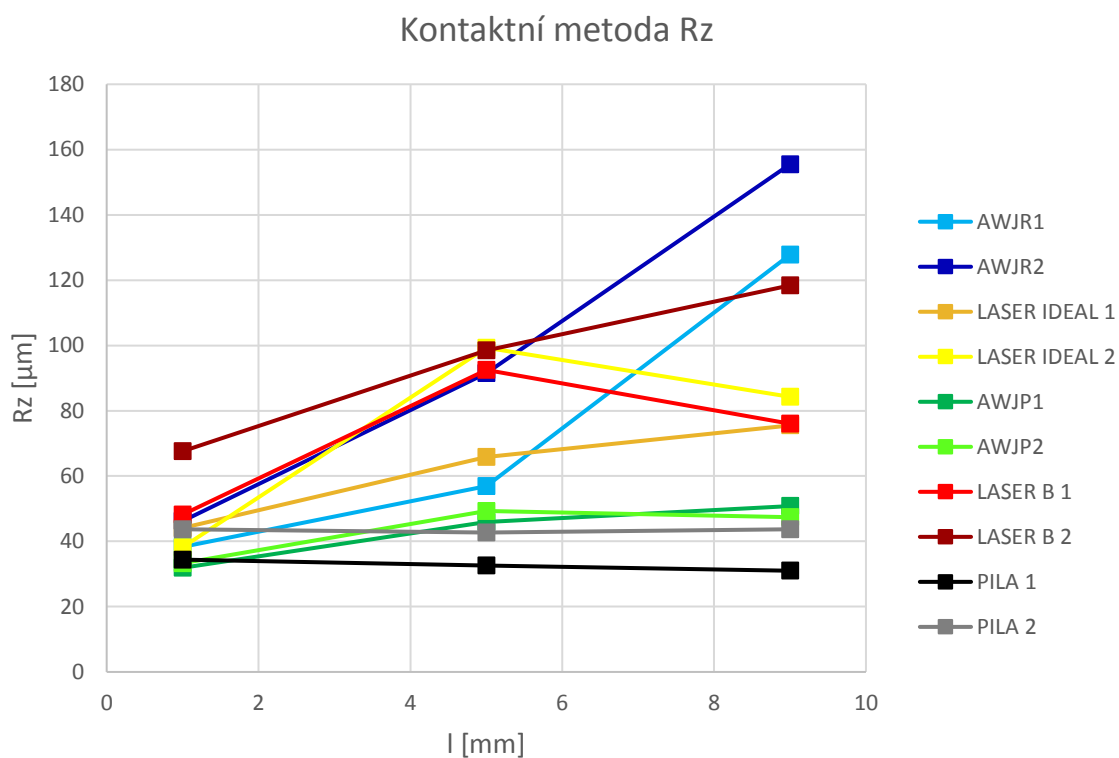
Graf 8.6.1 Srovnání drsnosti povrchu – bezkontaktní metoda



Graf 8.6.2 Srovnání drsnosti povrchu – kontaktní metoda

b) Nejvyšší výška profilu Rz

Graf 8.6.3 Srovnání drsnosti povrchu – bezkontaktní metoda



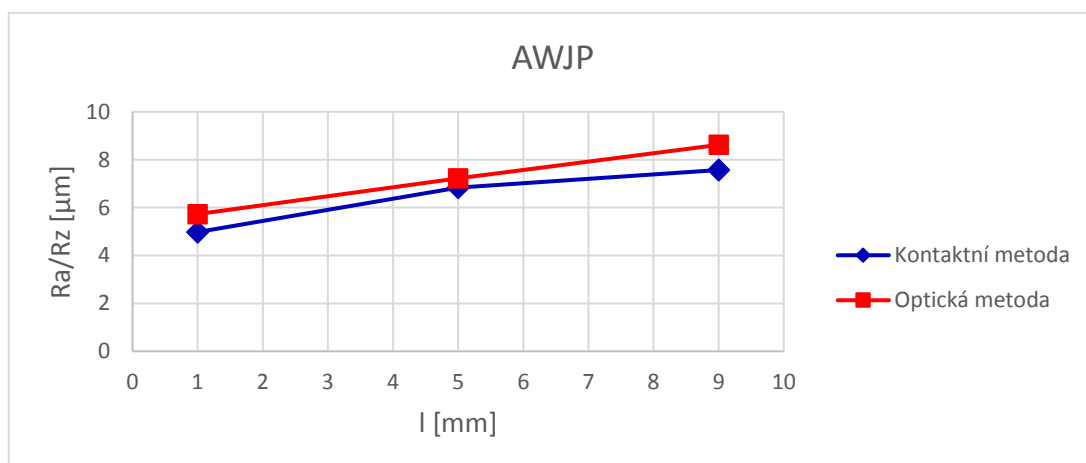
Graf 8.6.4 Srovnání drsnosti povrchu – kontaktní metoda

8.7 Srovnání měřicích metod

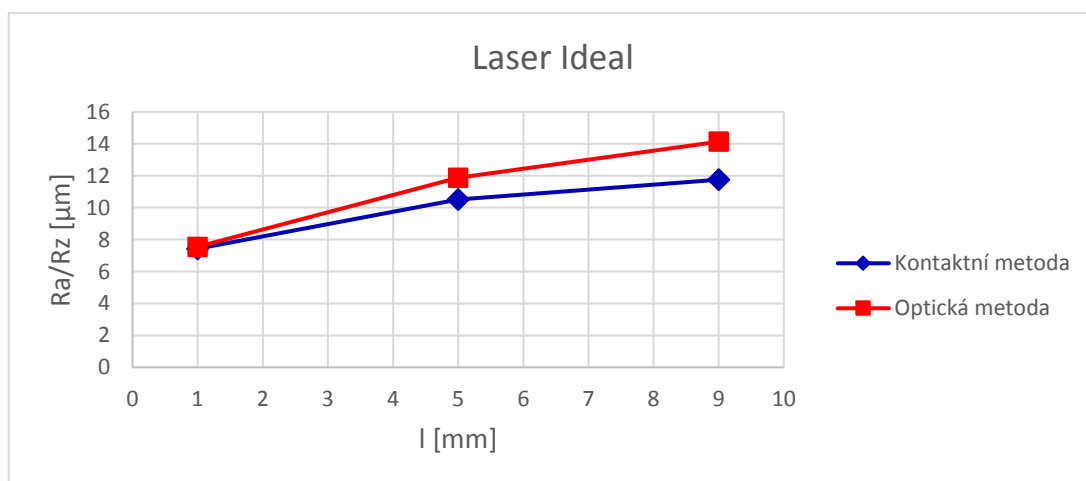
a) Střední aritmetická úchylka profilu Ra



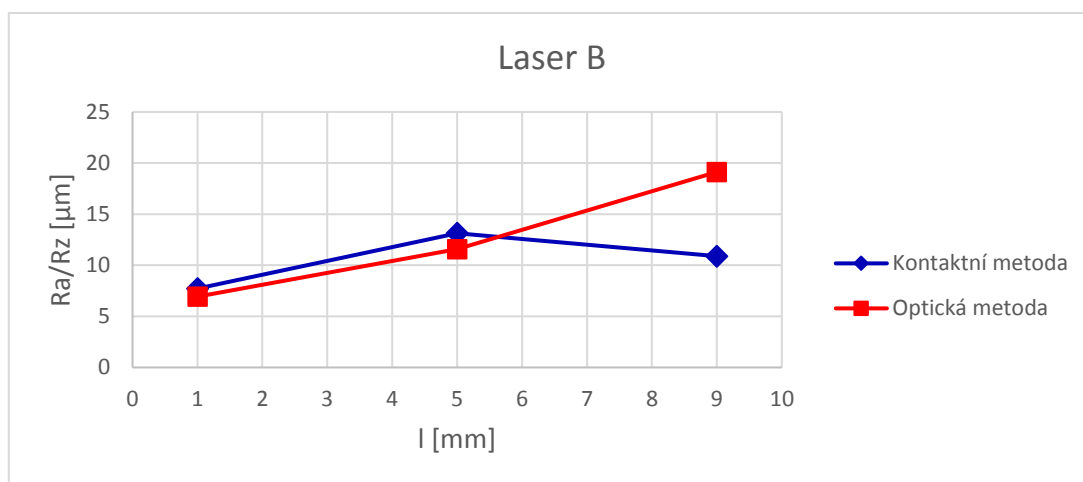
Graf 8.7.1 Abrazivní vodní paprsek ($950 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)



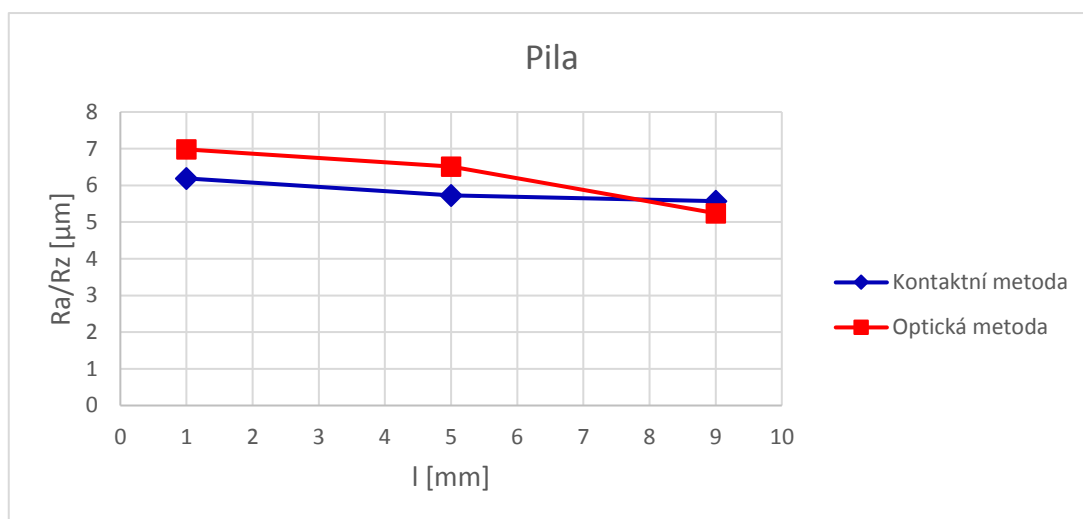
Graf 8.7.2 Abrazivní vodní paprsek ($300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)



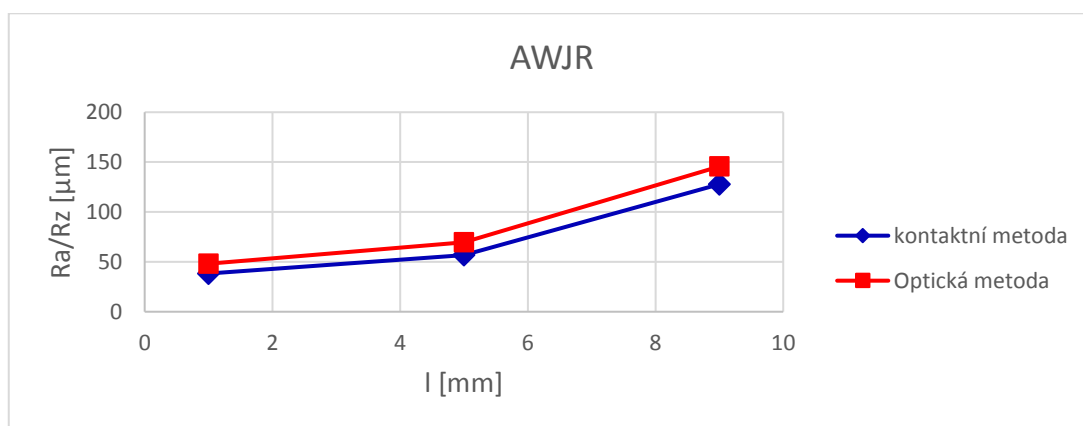
Graf 8.7.3 Laserový paprsek ($0,76 \text{ m/min}$)

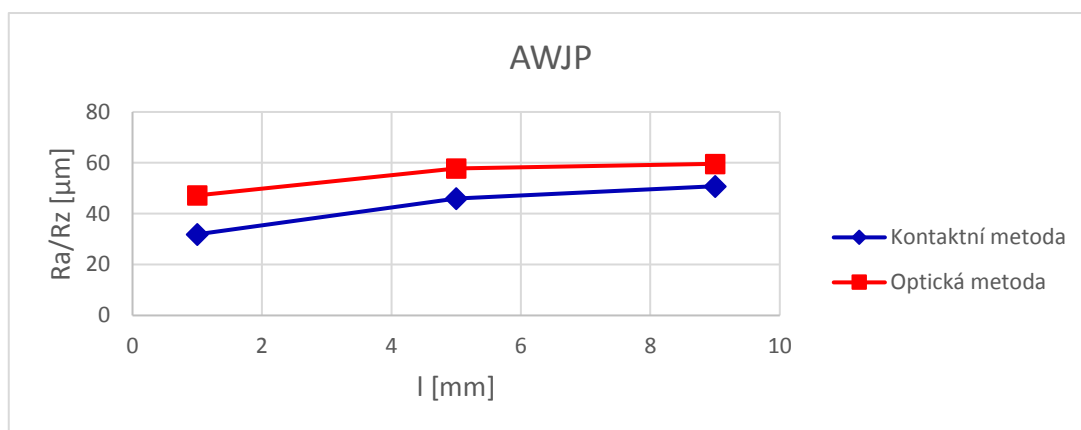
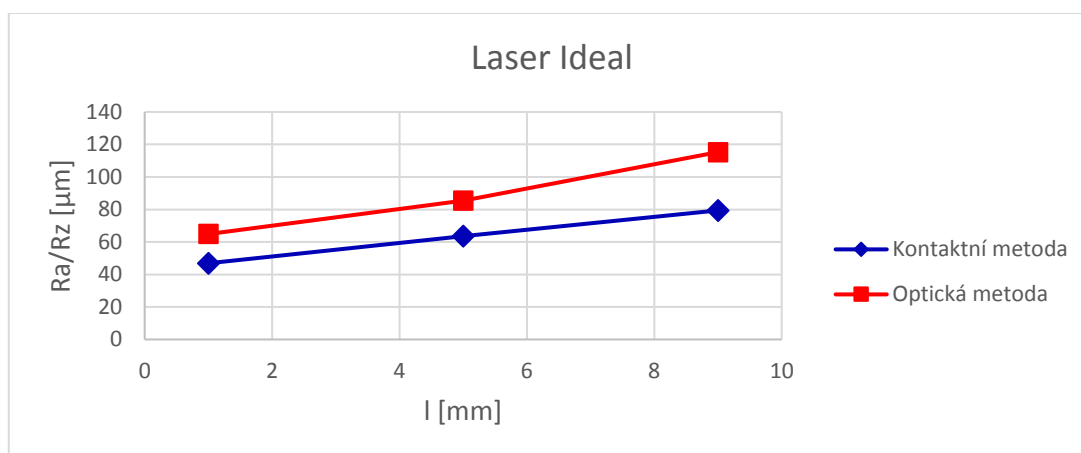
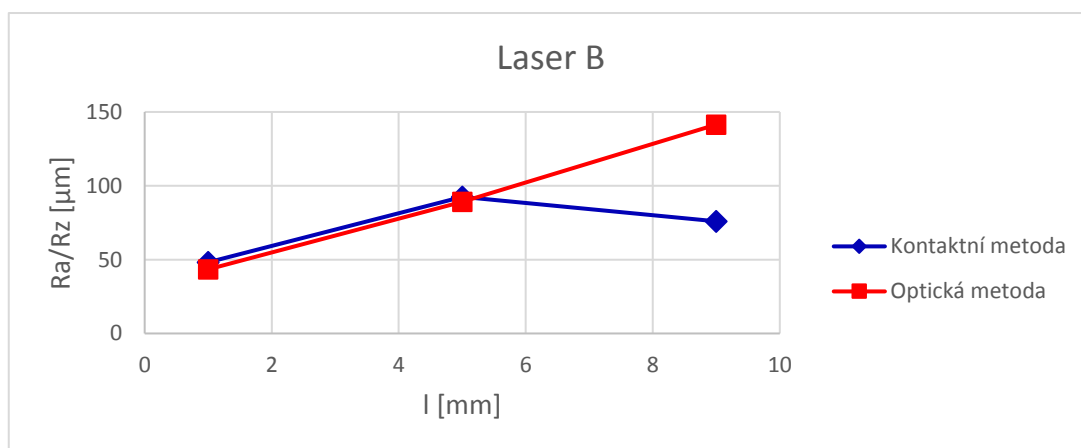


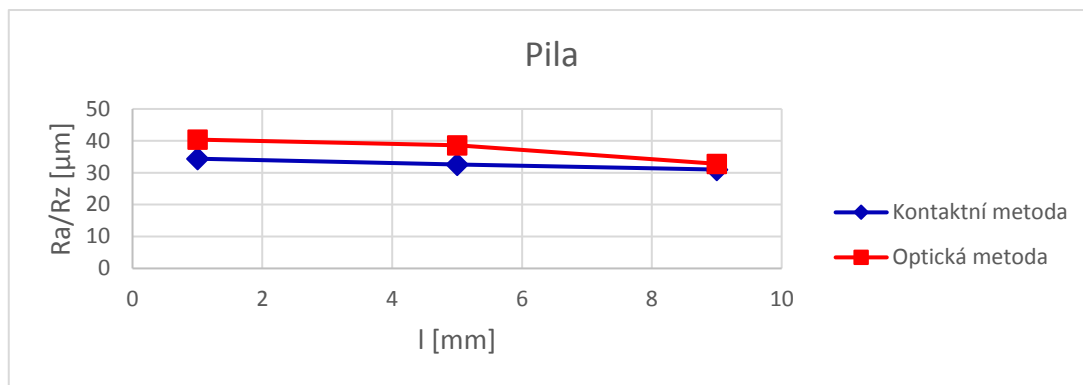
Graf 8.7.4 Laserový paprsek (0,85 m/min)



Graf 8.7.5 Pila

b) Nejvyšší výška profilu RzGraf 8.7.6 Abrazivní vodní paprsek ($950 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Graf 8.7.7 Abrasivní vodní paprsek ($300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)Graf 8.7.8 Laserový paprsek ($0,76 \text{ m/min}$)Graf 8.7.9 Laserový paprsek ($0,85 \text{ m/min}$)



Graf 8.7.10 Pila

9 Hodnocení

V rámci diplomové práce byly vytvořeny zkušební série vzorků z jednotného materiálu. Série vzorků byly zhotoveny různými technologiemi a za rozdílných technických podmínek řezu charakterizující použitou dělicí metodou. Tím byly získány různé kvality řezných ploch. S pomocí optického profilometru MICROPROF FRT a kontaktního drsnoměru Mitutoyo Surfes SJ-400 byla získána data pro zpracování. Tato vstupní data byla zpracována do grafů a porovnána.

Z dosažených výsledků je zřejmé, že tvar řezné plochy po řezání abrazivním vodním paprskem je podobný plochám řezaným laserovým paprskem. V horní části řezu (v místě vstupu paprsku do materiálu) je plocha téměř hladká bez výraznějších vlnitostí. Se vzrůstající vzdáleností od hrany řezu se zvyšuje nejen vlnitost, ale i drsnost, a je zřejmé, že při vysoké řezné rychlosti se abrazivní vodní paprsek v řezu ohýbá proti směru řezného pohybu. Drsnost plochy v dolní části řezu, kde paprsek materiál opouští, je největší.

Při obrábění abrazivním vodním paprskem má řezná rychlost podstatný vliv na drsnost povrchu, a to zejména v dolní části řezné plochy. Při nižší řezné rychlosti ($300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) se drsnost v horní a dolní části řezné plochy příliš neliší a se vzdáleností od vstupní hrany řezu vzrůstá jen nepatrně. Při vysoké zkoumané rychlosti ($950 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) je pak rozdíl mnohonásobně větší. Při nízké rychlosti se také abrazivní vodní paprsek téměř neohýbá, což se projevuje na kvalitě řezu, a paprsek je schopen lépe prořezat materiál i ve spodní části. Z toho vyplývá, že pro dosažení kvalitního řezu v celé ploše (kvalita Q5 případně Q4) je nutno podstatně snížit rychlost řezání.

Při řezání laserovým paprskem se musí také přihlídnout k řezné rychlosti, ale také se musí nastavit optimální ohnisková vzdálenost. Při řezu vyšší rychlosti (0,85 m/min) a ohniskové vzdálenosti -4 mm je již patrným okem vidět horší kvalita řezu, oproti řezu provedeném nižší rychlosti (0,76 m/min⁻¹) a s ohniskovou vzdáleností -6 mm.

Rychlost řezání hraje podstatnou roli také u laserového paprsku. Stejně jako u abrazivního vodního paprsku je největší rozdíl v kvalitě řezného povrchu vidět v dolní části řezu (při výstupu paprsku z materiálu).

Při řezání materiálu pilou, rychlost řezání nehraje moc velkou roli. Z grafů, uvedených v kapitole 8.5, je zřejmé, že drsnosti v horní, střední a dolní části řezné plochy jsou téměř shodné.

Měření drsnosti povrchu kontaktními přístroji je poměrně rychlé, přístroje jsou konstrukčně jednoduché, a tudíž i levnější. Malé rozměry snímačů umožňují kontrolu i obtížně dostupných ploch. Mezi nevýhody kontaktních přístrojů patří nutnost zcela se vyhybat nedokonalostem povrchu a nemožnost hodnotit plošné parametry textury povrchu. U použitých přístrojů dílenského provedení lze k nevýhodám přidat i omezené možnosti kalibrace a výrazné ovlivnění měření zvýšením teploty způsobeným vícenásobným opakovaným měřením.

Metoda optického měření kvality povrchu má ve srovnání s kontaktními metodami vyšší rozlišitelnost, širší možnosti kalibrace a umožňuje získat detailnější informace o textuře povrchu. Na druhou stranu je použitý přístroj konstrukčně složitý což zvyšuje jeho cenu a také znemožňuje kontrolu obtížně dostupných ploch.

Jak je zřejmé z grafů uvedených v kapitole 8.6, výsledky měření se u většiny vzorků příliš neliší.

V tradiční strojírenské prostředí mají kontaktní metody proti bezkontaktním zřejmou výhodu ve větší toleranci vůči znečištění. Snímací hrot odsune malé nečistoty nebo mu nevadí olejová vrstva. Bezkontaktní sonda vyžaduje skutečně čistý měřený povrch. Ve strojírenské praxi je zatím dávana přednost kontaktním měřícím přístrojům před bezkontaktními.

Tato zjištění v zásadě odpovídají poznatkům, ke kterým dospěla i další výzkumná pracoviště zabývající se technologiím vysokorychlostních vodních paprsků a laserových paprsků. Pro každý řezaný materiál je nutné stanovit konkrétní a ideální parametry tak, aby bylo dosaženo požadované kvality řezné plochy dle očekávaných požadavků. (20, 37)

10 Závěr

Cílem diplomové práce „Porovnání bezkontaktních a kontaktních měřících metod při hodnocení kvality řezných povrchů vytvořených různými technologiemi“ bylo studium topografie řezných ploch zhotovených různými dělicími metodami a jejich porovnání kontaktní a bezkontaktní metodou měření drsnosti.

V teoretické části jsem uvedla vybrané nekonvenční technologie obrábění. Jednotlivé technologie jsem stručně popsala a naznačila jsem fyzikální principy. Uvedla jsem také jejich podstatné výhody a nevýhody každé metody. Blíže jsem se zaměřila na technologie obrábění abrazivním paprskem a obrábění laserovým paprskem, jež byly použity pro získání zkušebních vzorků. Následně jsem uvedla metody hodnocení topografie řezného povrchu. V závěru teoretické části jsem uvedla přístroje pro hodnocení kvality povrchu použité v diplomové práci a popsala jsem jejich základní principy a parametry.

V experimentální části jsem srovnala kvalitu řezného povrchu jednotlivých zkušebních vzorků. V příslušné části jsem uvedla výsledky experimentů a stručně jsem je zhodnotila.

Výsledky měření kvality povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou se příliš neliší. Kontaktní metody mají v praxi větší uplatnění, díky menším rozměrům a větší toleranci vůči nečistotám povrchu oproti bezkontaktním metodám. Bezkontaktní metoda vyžaduje dokonale čistý povrch.

11 Použitá literatura

- [1] KRAJNÝ, Z. Vodný lúč v praxi. WJM. Bratislava: Ing Michal Mračko, 1998, 214s. ISBN 80-8057-091-4
- [2] Flow International Corporation. [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.flowwaterjet.com/>
- [3] AWAC [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.awac.cz/>
- [4] Řežeme vedou.cz [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.rezeme-vodou.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
- [5] MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/>
- [6] ALCOM ALVAL s.r.o. [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.vodnipaprsek.com/clanky/o-vodnim-paprsku.html>
- [7] HORÁČEK, Lukáš. Využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 69s. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
- [8] MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
- [9] NOVÁKOVÁ, V. *Srovnání abrazivního vodního paprsku s abrazivním suspenzním paprskem*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 51 s. Vedoucí práce: Ing. Libor Sitek, Ph.D.

- [10] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [11] TOS VARNSDORF a.s. [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.tosvarnsdorf.cz/cz/>
- [12] tumlikovo, Metal Cutting Technologies [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.tumlikovo.cz/>
- [13] Czech.cz [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.czech.cz/cz/Podnikani/Ekonomicka-fakta/Hlavni-pilire-ceskeho-prumyslu>
- [14] AQUAdem, s.r.o. [online]. [vid. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.aquadem.cz/>
- [15] MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://m.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni>
- [16] MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>
- [17] Laserové a plazmové řezání [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
- [18] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I.: elektroerozivní, elektrochemické a chemické obrábění*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3943-1.
- [19] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění II: obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem*. 2016: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3944-8.

[20] SUMMERS, David A. Waterjetting Technology, London: E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995, ISBN 0 419 19660 9

[21] Návodů do cvičení z předmětu strojírenská metrologie [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/NAVODY-DO-CVICENI-Z-PREDMETU-strojirenska-metrologie.pdf>

[22] Strojírenská metrologie, část 1 [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/STROJIRENSKA-METROLOGIE-1.dil.pdf>

[23] Strojírenská metrologie, část 2 [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/Strojirenska-metrologie-II-rizeni-jakosti.pdf>

[24] DUŠEK, P. Aplikace laseru při obrábění dřeva. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

[25] Ing. KRAJNÝ, Z. PhD. Vysokotlakový vodný lúč – WJM, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2011, 172s. ISBN 978-80-227-3535-3

[26] MORÁVEK, R. Nekonvenční metody obrábění. Západočeská Univerzita, 101s. ISBN 80-7082-518-9.

[27] Flow International Corporation. [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.flowwaterjet.com/>

[28] KARAFIÁTOVÁ, S. a LANGER, I. Nekonvenční technologie. 1. vyd. Havlíčkův Brod: nakladatelství FRAGMENT, 1998. 164s. ISBN 80-7200-296-1

[29] ABRASIV, a.s. [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://eshop.abrasiv.cz/tryskani/tryskaci-materialy/prirodni-granat/tryskacimaterial-prirodni-granat-80-mesh>

- [30] MILLER, D. S. Mikro Abrasive Waterjet Cutting, Sborník přednášek WJTA American Waterjet Conference, Minneapolis, 2001
- [31] BORTOLUSSI, A., CICCU, D., GROSSO, B., Cutting of Reinforced Concrete Using Abrasive Suspension Jet, Sborník přednášek WJTA American Waterjet Conference, Minneapolis, 2001
- [32] DORLE, A., TYREL, L. John, SUMMERS, David A., Measurement of Particle Velocities on High Speed Waterjet Technology, Sborník přednášek WJTA American Waterjet Conference, Texas, 2003
- [33] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina: EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [34] LABUS, T. J. (ed.). *Fluid Jet Technology - Fundamentals and Applications*. WJTA, St. Louis, 1995. ISBN 1-880342-01-4
- [35] MAŘÍKOVÁ, Petra. 3D abrazivní vodní paprsek. Brno, 2013. 91 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění, Vedoucí práce Ing. Karel Osíčka, Ph.D.
- [36] Princip Laseru [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>
- [37] ZELENÁK, Michal. Měření a analýza nerovnosti povrchů vytvořených hydroabrazivním a laserovým dělením z hlediska materiálu a mechanismu desintegrace. Ostrava, 2012. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/96295/ZEL075_HGF_P1701_1702V001_2012.pdf?sequence=1. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Aplikovaná fyzika. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.
- [38] NPS PROAL s.r.o. [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.proal.cz/info/424413.htm>

[39] Surf test SJ-400 [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.chung-tsang.com.tw/upload/userfiles/file/SJ400.pdf?phpMyAdmin=43FBizCT9f2Tm4%2Cgbgm rCNWa0ze>

[40] Mitutoyo Česko s.r.o. [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: http://www.mitutoyo.cz/cs_cz/

[41] PIK INSTRUMENTS [online]. [vid. 2017-05-01]. Dostupné z WWW: <http://pik-instruments.pl/en/products/microprof-300/>